ORGANIZADORES
Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati
INNOVATE:
ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALÚRGICA
Atena
Editora
Ano 2023

ORGANIZADORES
Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati
INNOVATE:
ENGENHARIA DE
MATERIAIS E
METALÚRGICA
Atena
Editora
Ano 2023

Editora chefe
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora executiva
Natalia Oliveira
Assistente editorial
Flávia Roberta Barão
Bibliotecária
Janaina Ramos
Projeto gráfico
Camila Alves de Cremo
Ellen Andressa Kubisty
Luiza Alves Batista
Nataly Evilin Gayde
Thamires Camili Gayde
Imagens da capa
iStock
Edição de arte
Luiza Alves Batista

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

Innovate: Engenharia de materiais e metalúrgica

Diagramação: Luiza Alves Batista
Correção: Soellen de Britto
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

I58 Innovate: Engenharia de materiais e metalúrgica / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, Géssica Katalyne Bilcati. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-1720-0
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.200230409

1. Engenharia de materiais. 2. Engenharia metalúrgica. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Bilcati, Géssica Katalyne (Organizadora). III. Título.

CDD 669

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access, desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce,* ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

APRESENTAÇÃO

Na sociedade atual, onde cada vez mais se necessita de informações rápidas e eficientes, o repasse de tecnologias é uma das formas mais eficazes de se obter novas tendências mundiais. Neste cenário destaca-se as engenharias, as quais são um dos principais pilares para o setor empresarial. Analisar os campos de atuação, bem como pontos de inserção e melhoria dessa desta área é de grande importância, buscando desenvolver novos métodos e ferramentas para melhoria contínua de processos.

Estudar temas relacionados a engenharia é de grande importância, pois desta maneira pode-se aprimorar os conceitos e aplicar os mesmos de maneira mais eficaz. O aumento no interesse se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral. Além disso a busca pela otimização no desenvolvimento de projetos, leva cada vez mais a simulação de processos, buscando uma redução de custos e de tempo.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de engenharia, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais. Sendo hoje que utilizar dos conhecimentos científicos de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

Géssica Katalyne Bilcati

SUMÁRIO

SUMÁRIO

USO DE RESÍDUO INDUSTRIAL (GESSO) COMO REFORÇO A COMPRESSÃO DE SISTEMAS EPÓXI

Data de submissão: 20/08/2023 *Data de aceite: 01/09/2023*

Walisson Pogian de Jesus
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/7454495480955258

David Coverdale Rangel Velasco
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/9356476964884212

Júlia Audrem Gomes de Oliveira
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/6012000864762349

Felipe Perissé Duarte Lopes
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/1944239448019813

Djalma Souza
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/5013801434143344

Carlos Maurício Fontes Vieira
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/6309884585355966

RESUMO: A indústria de processos desempenha um papel vital na fabricação de diversos produtos, mas também enfrenta desafios decorrentes da geração de resíduos. Transformar esses subprodutos em recursos de valor agregado é uma meta crescente para promover a sustentabilidade econômica e ambiental. Os compósitos, conhecidos por combinar propriedades distintas de materiais diversos, estão emergindo como uma abordagem promissora na engenharia de materiais, permitindo a obtenção de materiais otimizados que possuem o potencial de utilizar os resíduos como os supracitados. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência da incorporação de resíduos da produção de ácido lácteo, gesso industrial, na resistência a compressão de um sistema epóxi DGEBA/DETA. Formulações com 0, 5, 10, 15 e 20% de resíduos foram

produzidas e ensaiadas conforme a ASTM D695. Os resultados deste trabalho indicaram que a adição de particulados de gesso pode ensejar em ganhos significativos de resistência e rigidez de sistemas epóxi quando sujeitos a compressão, o que implica em ganhos tecnológicos e ambientais dos compósitos desenvolvidos.
PALAVRAS-CHAVE: Co-produtos; Compósitos; Gesso Industrial; Resistência à compressão; Sulfato de Cálcio.

USE OF WASTE INDUSTRIAL (GYPSUM) AS A REINFORCEMENT IN THE COMPRESSION OF EPOXY SYSTEMS

ABSTRACT: The process industry plays a vital role in the manufacture of various products, but it also faces challenges arising from waste generation. Turning these by-products into value-added resources is a growing goal to promote economic and environmental sustainability. Composites, known for combining different properties of different materials, are emerging as a promising approach in materials engineering, allowing the obtainment of optimized materials that have the potential to use wastes such as those mentioned above. In this sense, this work aims to evaluate the influence of the incorporation of residues from the production of lactic acid, industrial gypsum, on the compressive strength of a DGEBA/DETA epoxy system. Formulations with 0, 5, 10, 15 and 20% residues were produced and tested according to ASTM D695. The results of this work indicated that the addition of gypsum particulates can lead to significant gains in strength and stiffness of epoxy systems when subjected to compression, which implies technological and environmental gains for the composites developed.
KEYWORDS: Co-products; Composites; Industrial Gypsum; Compressive Strength; Calcium Sulfate.

1 I INTRODUÇÃO

A indústria de processos desempenha um papel fundamental na produção de uma vasta gama de produtos, desde alimentos e produtos químicos até materiais de construção e energia. No entanto, essa atividade industrial também gera uma quantidade significativa de resíduos, que podem variar em composição e grau de toxicidade. Esses resíduos incluem efluentes líquidos, emissões gasosas, resíduos sólidos e subprodutos indesejados, muitos dos quais apresentam desafios ambientais e de gerenciamento. A busca por práticas de produção mais sustentáveis e o desenvolvimento de tecnologias de reutilização desses resíduos são áreas de foco crescente na indústria de processos, visando minimizar os impactos negativos e maximizar a eficiência no uso de recursos (OSSOLI *et al.*, 2023; MARVILA *et al.*, 2023; BRITO *et al.*, 2023; TURKBEN *et al.*, 2023; AHMED *et al.*, 2023).

Nessas produções é comum a geração de materiais que geralmente são descartados em aterros. A utilização de aterros acarreta custos de transporte, disposição e da ótica ambiental, deve ser utilizada como último recurso. Neste sentido, é crescente o empenho em transformar estes resíduos sólidos em coprodutos, que deixariam de ser um custo adicional, e se tornariam uma fonte de renda (DE ABREU; FORTES; BRITO, 2019).

Um exemplo notável é a produção de ácido láctico, que envolve a fermentação de hidratos de carbono. Como subproduto desse processo, é produzido cerca de uma tonelada de gesso, que deve ser descartada para cada tonelada de ácido lático produzida pelo método convencional de fermentação e recuperação. Esses fatores prejudicam na rentabilidade dos processos produtivos, e até mesmo, podem ensejar na inviabilidade econômica, devido aos custos de descartes dos resíduos (OJO; SMIDT, 2018).

Adicionado a isto, a busca por materiais avançados que atendam às exigências contemporâneas de desempenho, sustentabilidade e economia tem sido uma constante na área de engenharia de materiais. Nesse contexto, os compósitos têm ganhado destaque, oferecendo a possibilidade de combinar propriedades distintas de diferentes materiais para criar sistemas híbridos otimizados (SANGMESH *et al.*, 2023; LUNETTO *et al.*, 2023).

O resíduo de gesso tem potencial para desempenhar diversas funções, como revestir paredes e tetos, funcionar como forro e retardador do tempo de solidificação do cimento. Além disso, encontra aplicações na área médica, como em cirurgias e traumatologia, assim como na agricultura como condicionador de solo. Na indústria cerâmica, metalúrgica e de plásticos, é empregado para criar moldes, destacando-se entre uma variedade de outros aplicações. Por outro lado, o gesso, composto majoritariamente por sulfato de cálcio, é conhecido por sua baixa resistência à compressão, limitando seu uso. Entretanto, quando utilizado como reforço em certas aplicações, apresenta propriedades interessantes (BARTOLOMEI; WIEBECK, 2019).

Lewis *et al.* (2006), utilizou o sulfato de cálcio (CS) incorporado à matriz polimérica de carboximetilcelulose (CMC) com hialuronano (HY). Observou-se que houve um aumento significativo da resistência à compressão em concentrações de 7,5% e 10% de CMC com CS comparado ao CMC puro. A resistência aumentou em 88% e 85%, respectivamente (LEWIS; THOMES; PULEO, 2006).

Dentre os polímeros mais utilizados como matriz para compósitos, a resina epóxi devido à sua combinação de resistência mecânica e aderência, conferindo aos materiais compósitos uma boa durabilidade. As resinas epóxi são polímeros sintéticos, com um nome que deriva do grego: “epi” (sobre ou entre) e “oxi” (oxigênio). Essa designação está intrinsecamente ligada à estrutura química do grupo epóxi, que consiste em um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono, Figura 1 (JIN; LI; PARK, 2015).

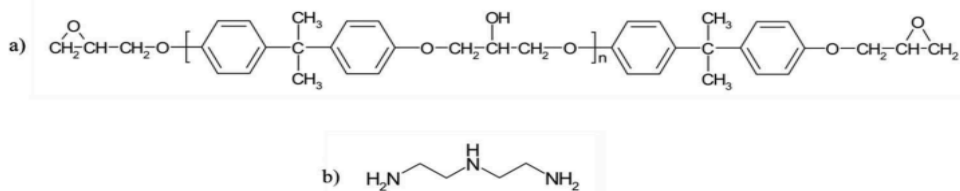



Figura 1. Estruturas químicas de (a) DGEBA (n = 0,03) e (b) DETA.

Fonte: BOUTIN *et al.* (2021).

A resina epóxi éter diglicidílico de bisfenol A (DGEBA) combinada com o agente de cura dietilenotriamina (DETA) tem sido amplamente estudada devido às suas propriedades mecânicas e resistência química. Essa combinação resulta em uma matriz polimérica de alta rigidez e durabilidade, tornando-a ideal para diversas aplicações, como na indústria aeroespacial, automotiva e construção civil (ZACHARUK *et al.*, 2011).

Velasco *et al.* (2023) demonstraram que materiais particulados usados como cargas como um potencial agente modificador para composições epóxi, provando que a utilização de resíduos alterou positivamente e melhoram o desempenho dos compósitos epoxídicos. Foi observado que o processamento das partículas teve um impacto positivo na resistência à compressão dos compósitos, onde pode-se observar que as formulações contendo 10% e 20% de carga processada apresentaram resultados superiores em comparação com a resina epóxi pura, enquanto a formulação contendo 30% apresentou desempenho comparável.

Uma das principais vantagens da incorporação de resíduos industriais, como o gesso, no compósito é a gestão sustentável de resíduos. A reutilização de resíduos industriais como carga reforçadora em compósitos não apenas confere uma destinação adequada a esses materiais, mas também reduz a demanda por recursos in natura e minimiza o impacto ambiental associado à produção de materiais. Além disso, essa abordagem contribui para uma sustentabilidade econômica, em que resíduos são transformados em recursos, causando impacto positivo em toda uma cadeira produtiva (TISSERANT *et al.*, 2017).

No entanto, a composição adequada desse compósito é fundamental para garantir um equilíbrio entre as propriedades desejadas. A proporção entre a matriz polimérica e a carga de gesso desempenha um papel crucial na determinação das propriedades mecânicas, como a resistência à compressão. Reduzir a porcentagem de resina epóxi na matriz do compósito pode resultar em uma maior permeabilidade do material, afetando sua resistência e durabilidade (SIENKIEWICZ; CZUB, 2023; STAROKADOMSKY; ISHENKO, 2019).

Neste sentido, esse estudo visa avaliar a otimização da composição, levando em consideração tanto as propriedades mecânicas quanto as considerações ambientais. Sendo explorados os efeitos da proporção entre os componentes, bem como o impacto da reutilização do resíduo industrial, o gesso, na propriedade mecânica de resistência à compressão do compósito. Tendo como objetivo avançar no entendimento das potencialidades desses compósitos híbridos para diversas aplicações, contribuindo para a convergência entre tecnologia e responsabilidade ambiental.

2 I MATERIAIS E MÉTODOS

Os particulados utilizados nesse estudo são resíduos oriundos da produção de ácido lático da Corbion (Purac), Campos dos Goytacazes – RJ, conhecido como gesso industrial. Após processo de amostragem, o subproduto foi seco por 24 horas a 70°C em uma estufa para remoção do excesso umidade. Posteriormente, foi realizado um peneiramento com peneira de 100 mesh, sendo utilizado o material que passasse por esta.

O sistema epóxi utilizado neste trabalho foi o DGEBA/DETA, que é fabricado pela Silaex e comercializado pela Avipol sob respectivamente nome SQ1005 e SQ3131. A quantidade de endurecedor utilizada para cada 100 partes de resina (phr), em peso, foi igual à 16.

Foram examinados 5 corpos de prova para cada composição, com frações volumétricas de 0, 5, 10, 15 e 20% de Gesso. Os corpos de prova foram produzidos utilizando o gesso imediatamente após a sua retirada da estufa, para evitar absorção de umidade do ar, e confeccionados utilizando moldes de silicone. Após a cura em temperatura ambiente, os corpos de prova passaram por uma pós-cura na estufa a 70°C durante 2,5 horas. Em seguida, eles foram lixados para adquirir dimensões de 12,5x12,5x6 mm e ensaiados a 1,5 mm/min, de acordo com a ASTM D695-23 (ASTM, 2023). Para a condução deste experimento, empregou-se equipamento de ensaios mecânicos universal da marca Instron, modelo 34FM-100-SA, conforme a Figura 2.

Figura 2: Maquina Universal de Ensaios - Instron 34FM-100.

Fonte: Adaptado de INSTRON (2019).

Por fim, foi conduzida uma análise de variância (ANOVA) juntamente com o teste de Tukey, visando a observação de discrepâncias estatísticas potenciais entre os grupos amostrais. O nível de significância estatística adotado foi de 5%. Estas estimativas foram executadas empregando o programa PAST, seguindo a abordagem algorítmica proposta por Copenhaver e Holland (1988).

3 I RESULTADOS

A resistência a compressão dos compósitos pode ser observada na Figura 3. Por meio desta, pode-se observar que a inserção de particulados de gesso pode ensejar em ganhos de resistência de 12 a 23,5%, sendo todas as formulações com a incorporação de gesso significativamente mais resistentes segundo a ANOVA/teste de Tukey. Acrescenta-se ainda que, há uma tendência de redução de resistência nas formulações com 20% de gesso, quando comparada com as formulações com 10 e 15% de gesso. Contudo está ainda não é significante segundo a ANOVA.

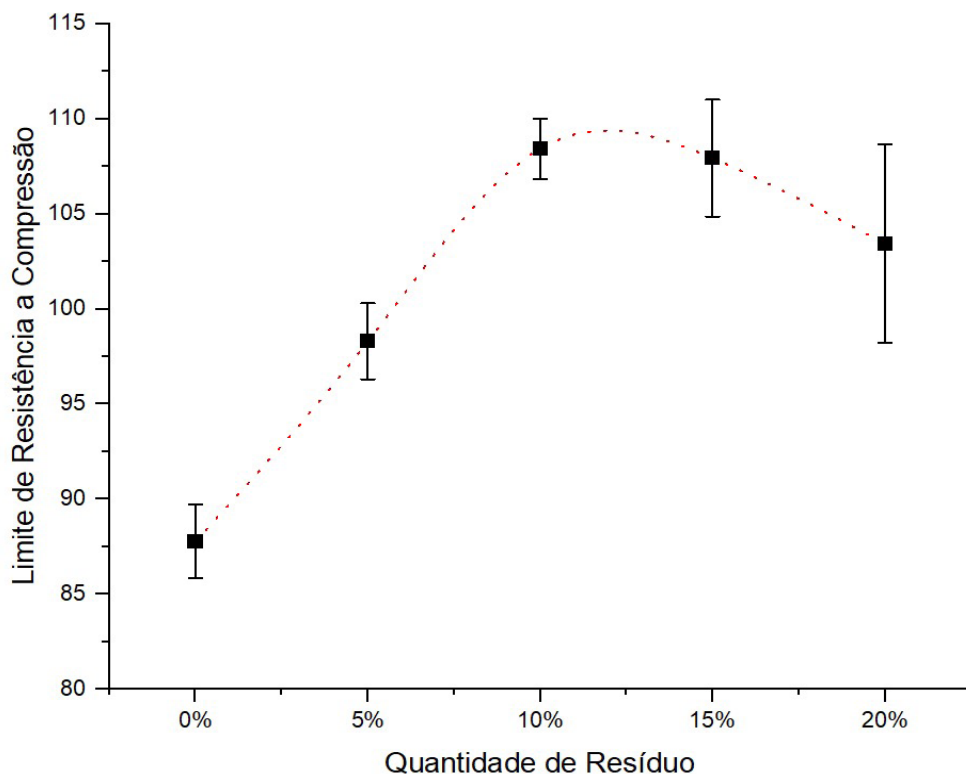



Figura 3: Resistência a compressão em função da quantidade de resíduos.

Este comportamento está em linha com a literatura que aponta que a inserção de particulados pode elevar a resistência da matriz epóxi, mas a partir de determinado valor de incorporação se observa uma queda de resistência a compressão e aumento de desvio padrão (VELASCO *et al.*, 2023). Isto pode ser explicado pelo resíduo possuir uma boa interface com a matriz, e inicialmente atuar como reforço. Contudo, a partir de uma determinada quantidade de particulados, estes tendem a elevar a presença de vazios e a se aglomerar, o que não só insere defeitos na matriz, mas também prejudica na interface entre reforço e particulado (LUO *et al.*, 2021; GONÇALVES *et al.*, 2019; RUEDA *et al.*, 2017).

A cerca da rigidez, pode-se observar um aumento conforme se inseria particulados na formulação, Figura 4. Isto pode ser explicado pela natureza do reforço que é rígido, bem como que a inserção destes particulados tende a diminuir a mobilidade das cadeias poliméricas e, portanto, elevar o módulo de elasticidade dos particulados (BOCCARUSSO *et al.*, 2021; DANILAEV *et al.*, 2022).

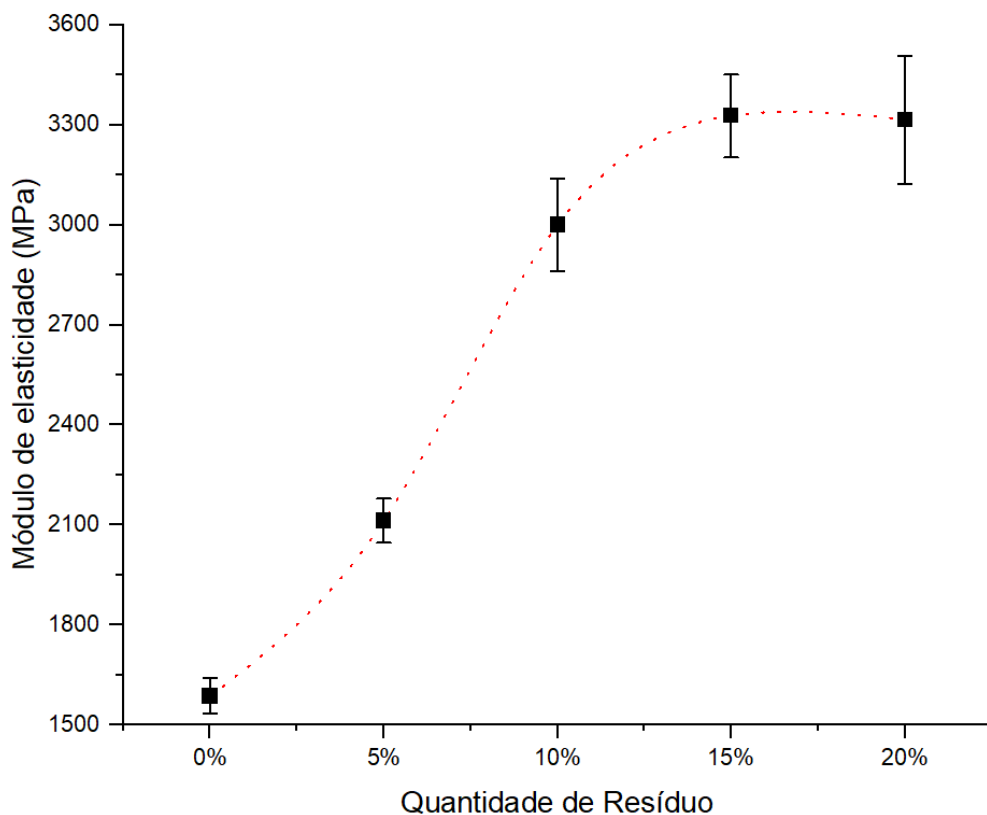



Figura 4: Módulo de elasticidade em função da quantidade de resíduos.

A aplicação da ANOVA e teste de Tukey, ressaltou os ganhos de rigidez observados a cada adição de 5% de particulados são significativos. Esta tendência, entretanto, não se manifestou nas formulações contendo 15% e 20% de gesso, uma vez que não se observou diferenças significativas entre esses grupos amostrais. O que está em linha com comportamento de outros materiais da literatura, sendo isto justificado também pela inserção de defeitos e piora de interface matriz e reforço (VELASCO *et al*., 2023; LUO *et al*., 2021; GONÇALVES *et al*., 2019; RUEDA *et al*., 2017).

4 I CONCLUSÕES

Por meio deste trabalho pode-se observar que a adição dos particulados de gesso permite ganhos de resistência e rigidez significativos do sistema epóxi, quando sujeito a compressão. Neste sentido, observou-se uma viabilidade da utilização deste resíduo tanto do ponto de vista ambiental, quanto do ponto de vista tecnológico.

REFERÊNCIAS

AHMED, K. Z.; FAIZAN, M.; AZAM, F.; FAHEEM, A. Hardness assessment of novel waste tire rubber-polypropylene composite. **Materials today: proceedings**, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.445

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D695-23: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. West Conshohocken: **ASTM International**, 2023. DOI: 10.1520/D0695-23

BARTOLOMEI, S.S.; WIEBECK, H. Characterization of gypsum waste from civil construction to obtain polymer composites. **Materials science forum**, v. 958, p. 47–51, 2019. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.958.47

BOCCARUSSO, L.; MOCERINO, D.; DURANTE, M.; IUCOLANO, F.; MINUTOLO, F. M. C.; LANGELLA, A. Recyclability Process of Gypsum Reinforced with Hemp Fabrics: Impact and Flexural Behaviour. **ESAFORM 2021**, 2021. DOI: 10.25518/esaform21.4044

BOUTIN, M.; ROGEON, A.; AUFRAY, M.; PIQUET, R.; ROUILLY, A. Influence of flax fibers on network formation of DGEBA/DETA matrix. **Composite interfaces**, v. 28, n. 1, p. 17–34, 2021. DOI: 10.1080/09276440.2020.1736454

BRITO, M. R.; MARVILA, M. T.; LINHARES JUNIOR, J. A. T. AZEVEDO, A. R. G. Evaluation of the properties of adobe blocks with clay and manure**. Buildings**, v. 13, n. 3, p. 657, 2023. DOI: 10.3390/buildings13030657

COPENHAVER, M. D.; HOLLAND, B. Computation of the distribution of the maximum studentized range statistic with application to multiple significance testing of simple effects**. Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 30, n. 1, p. 1-15, 1988. DOI: 10.1080/00949658808811082

DANILAEV, M. P.; KARANDASHOV, S. A.; KIYAMOV, A. G.; KLABUKOV, M. A.; KUKLIN, V. A.; SIDOROV, I. N.; ENSKAYA, A. L. Formation and Behavior of Residual Stresses in Particulate-Filled Polymer Composites with a Partially Crystalline Structure. **Phys Mesomech**, v. 25, p. 335-343, 2022. DOI: 10.1134/S1029959922040075

DE ABREU, J. A.; FORTES, A. C. C.; BRITO, J. S. Reaproveitamento das cascas de coco verde em teresina-pi: perspectivas e possibilidades. **In Anais do 2º Congresso Sul-Americano de Residuos Sólidos e Sustentabilidade**, 2019. Disponível em: https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/IV-118.pdf. Acesso em: 15 Ago. 2018.

GONÇALVES, J.A.V.; CAMPOS, D.A.T.; OLIVEIRA, G.J.; ROSA, M.L.S.; MACÊDO, M.A. Mechanical properties of epoxy resin based on granite stone powder from the Sergipe fold-and-thrust belt composites. **Materials Research**, v. 17, p. 878-887, 2014. DOI: 10.1590/S1516-14392014005000100

INSTRON. Request 3d cad model of your 3400 series frame. Cairo: **INSTRON Corporation**, 2022. Disponível em: https://www.instron.com/pt-br/products/testing-systems/universal-testing-systems/low-force-universal-testing-systems/3400-series/request-3d-cad-model. Acesso em: 10 Ago. 2018.

JIN, F.; LI, X.; PARK, S. Synthesis and application of epoxy resins: A review. **Journal of industrial and engineering chemistry**, v. 29, p. 1–11, 2015. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.03.026

LEWIS, K. N.; THOMAS, M. V.; PULEO, D. A. Mechanical and degradation behavior of polymer-calcium sulfate composites. **Journal of materials science: Materials in medicine**, v. 17, n. 6, p. 531–537, 2006. DOI: 10.1007/s10856-006-8936-0

LUNETTO, V.; GALATI, M.; SETTINERI, L.; IULIANO, L. Sustainability in the manufacturing of composite materials: A literature review and directions for future research**. Journal of manufacturing processes**, v. 85, p. 858–874, 2023. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.020

LUO, X.; GAO, J.; LIU, C; HE, Z. Effects of polymers on workability and early microstructure of gypsum-based materials**. ACI materials journal**, v. 118, n. 5, p. 29–34, 2021. DOI: 10.14359/51732929

MARVILA, M. T.; DE AZEVEDO, A. R. G.; LINHARES JÚNIOR, J. A. T.; Vieira, C. M. F. Activated alkali cement based on blast furnace slag: effect of curing type and concentration of Na20. **Journal of materials research and technology**, v. 23, p. 4551–4565, 2023. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.088

OJO, A. O.; DE SMIDT, O**.** Lactic acid: A comprehensive review of production to purification. **Processes**, v. 11, n. 3, p. 688, 2023. DOI: 10.3390/pr11030688

OSSOLI, E.; VOLPINTESTA, F.; STABILE, P.; REGGIANI, A.; SANTULLI, C.; PARIS, E. Upcycling of composite materials waste into geopolymer-based mortars for applications in the building sector**.** **Materials letters**, v. 333, n. 133625, 2023. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.133625

RUEDA, M. M.; AUSCHER, M. C.; FULCHIRON, R.; PÉRIÉ, T.; MARTIN, G.; SONNTAG, P.; CASSAGNAU, P. Rheology and applications of highly filled polymers: A review of current understanding**.** **Progress in polymer science**, v. 66, p. 22–53, 2017. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2016.12.007

SANGMESH, B.; PATIL, N.; JAISWAL, K. K.; GOWRISHANKAR, T. P.; SELVAKUMAR, K. K.; JYOTHI, M. S.; JYOTHILAKSHMI, R.; KUMAR, S. Development of sustainable alternative materials for the construction of green buildings using agricultural residues: A review. **Construction and building materials**, v. 368, n. 130457, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130457

SIENKIEWICZ, A.; CZUB, P. Modification of epoxy compositions by the application of various fillers of natural origin. **Materials**, v. 16, n. 8, p. 3149, 2023. DOI: 10.3390/ma16083149

STAROKADOMSKY, D.L.; ISHENKO, A.A. Epoxy Composites Filled with Gypsum (Alabaster G-5): Possible Ways for Strengthening, Stabilization, and Structuration. **In Composite Materials for Industry, Electronics, and the Environment**; Apple Academic Press: Waretown, NJ, p. 25–44, 2019.

TISSERANT, A.; PAULIUK, S.; MERCIAI, S.; SCHMIDT, J.; FRY, J.; WOOD, R.; TUKKER, A. Solid waste and the circular economy: A global analysis of waste treatment and waste footprints: Global analysis of solid waste and waste footprint. **Journal of industrial ecology**, v. 21, n. 3, p. 628–640, 2017. DOI: 10.1111/jiec.12562

TURKBEN, M.; KOCAMAN, S.; ÖZMERAL, N.; SOYDAL, U.; CERIT, A.; AHMETLI, G. Sustainable production of recycled rubber waste composites with various epoxy systems: A comparative study on mechanical and thermal properties. **Industrial crops and products**, v. 195, n. 116490, 2023. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116490

VELASCO, D.C.R.; LOPES, F.P.D.; SOUZA D.; LOPERA, H.A.C.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F. Evaluation of composites reinforced by processed and unprocessed coconut husk powder. **Polymers**, v. 15, n. 5, p. 1195, 2023. DOI: 10.3390/polym15051195

ZACHARUK, M.; BECKER, D.; COELHO, L. A.; PEZZIN, S. H. Estudo da reação entre polietileno glicol e resina epoxídica na presença de N,N-dimetilbenzilamina**. Polímeros**, v. 21, n. 1, p. 73–77, 2011. DOI: 10.1590/S0104-14282011005000009

RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI COM INCORPORAÇÃO DE GESSO INDUSTRIAL

Data de submissão: 20/08/2023 *Data de aceite: 01/09/2023*

David Coverdale Rangel Velasco
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/9356476964884212

Walisson Pogian de Jesus
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/7454495480955258

Júlia Audrem Gomes de Oliveira
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/6012000864762349

Felipe Perissé Duarte Lopes
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/1944239448019813

Djalma Souza
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/5013801434143344

Carlos Maurício Fontes Vieira
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
http://lattes.cnpq.br/6309884585355966

RESUMO: Nos últimos anos, o interesse crescente por materiais sustentáveis reflete a busca por reduzir o impacto ambiental. A estratégia de diminuir a proporção de resina epóxi em compósitos destaca-se pelo seu potencial na economia de recursos e redução de emissões de carbono, especialmente ao empregar resíduos que em outrora seriam descartados. Nesse contexto, este estudo visa avaliar como a incorporação de resíduos industriais influencia a resistência ao impacto de compósitos de matriz epóxi. Foram elaboradas cinco formulações, variando de 0 a 20% de particulados de gesso industrial, originados do processo de produção de ácido lático. Além de ensaios de impacto, também se avaliou a densificação das formulações. Os resultados indicam que a adição de resíduos progressivamente reduz a densidade dos compósitos. Não obstante, observou-se que é possível

substituir pericialmente a resina epoxi pelo resíduo, sem perdas significativas de resistência ao impacto, conforme evidenciado neste estudo.
PALAVRAS-CHAVE: Epóxi, Compósitos, Resíduos Industriais, Resistência ao Impacto, Sulfato de Cálcio.

IMPACT RESISTANCE OF EPOXY MATRIX COMPOSITES WITH INCORPORATION OF INDUSTRIAL GYPSUM

ABSTRACT: In recent years, the growing interest in sustainable materials reflects the quest to reduce the environmental impact. The strategy of reducing the proportion of epoxy resin in composites stands out for its potential in saving resources and reducing carbon emissions, especially when using waste that would otherwise be discarded. In this context, this study aims to evaluate how the incorporation of industrial waste influences the impact resistance of epoxy matrix composites. Five formulations were prepared, ranging from 0 to 20% of industrial gypsum particulates, originating from the lactic acid production process. In addition to impact tests, the densification of the formulations was also evaluated. The results indicate that the addition of waste progressively reduces the density of the composites. However, it was observed that it is possible to expertly replace the epoxy resin with the residue, without significant loss of impact resistance, as evidenced in this study.
KEYWORDS: Epoxy, Composites, Industrial Waste, Impact Resistance, Calcium Sulfate.

1 I INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, observa-se um interesse crescente pela busca de materiais que não apenas atendam aos requisitos de projeto, mas também sejam sustentáveis (ÓHAISEADHA *et al.*, 2020). A procura por materiais eficientes em termos de recursos está em sintonia com os esforços globais para mitigar a pegada ambiental das indústrias. A redução da proporção de resina epóxi em compósitos emerge como uma estratégia promissora. Embora as resinas epóxi exibam propriedades mecânicas notáveis, sua dependência de recursos não renováveis e processos de produção com intensivo consumo de energia levantam preocupações sobre sua sustentabilidade a longo prazo. Como resultado, a redução da quantidade de resina epóxi não apenas contribui para a conservação de recursos, mas também diminui a demanda por materiais não renováveis e reduz as emissões de carbono associadas (TISSERANT *et al.*, 2017).

Entre os avanços nesse campo, a estratégia promissora de combinar polímeros com resíduos tem se destacado, permitindo otimizar a utilização de materiais. Isso ocorre devido à redução da demanda por polímeros, uma vez que há uma substituição parcial destes pelos resíduos, bem como pelo uso de materiais que seriam descartados em outrora (ELHOUSARI *et al.*, 2019; OWA *et al.*, 2023; VELASCO *et al.*, 2023).

Fiore *et al.* (2018) investigaram o efeito do reforço com pó de mármore, tratado e não tratado com plasma, nas características mecânicas, térmicas e viscoelásticas de compósitos epóxi. Neste trabalho, observou que o tratamento do pó de mármore melhorou

a interface com matriz, o implicou em um aumento na resistência e rigidez do compósito, tanto quando sujeito a esforços trativos, quanto flexivos. Adicionalmente, os compósitos epoxídicos reforçados com pó de mármore tratado exibiram maior estabilidade térmica e módulo de armazenamento em comparação ao epóxi puro, o que reforça que fora obtida uma boa interface com o resíduo.

Silva *et al.* (2020) analisaram a viabilidade do uso de resíduos de borracha de pneus como reforço em espuma de poliuretano (PU) derivada do óleo de mamona para obtenção de compósitos, como alternativa para matéria-prima petroquímica industrial. Analisando os resultados dos ensaios de impacto, foi observado que a adição de pó de borracha ao PU provocou uma melhora na resistência ao impacto devido ao aumento da energia absorvida.

Neste sentido, os sistemas epóxi se destacam por possuírem: alta aderência; baixo coeficiente de expansão, bem como boas propriedades mecânicas, químicas e de isolamento (ZHANG *et al.*, 2021).

Costa *et al.* (2017) avaliou por meio de testes mecânicos e químicos os desenvolvimentos de compósitos epóxi para desenvolvimento de rochas artificiais utilizando chamote e brita como fase dispersa. A adição de cargas particuladas tornou o material mais rígido, elevando o módulo de elasticidade. A resistência à flexão da rocha artificial (29,97 MPa) foi superior ao valor recomendado (20 MPa) para aplicações de revestimento, demonstrando a eficiência da utilização do reforço. Foi realizado também um ataque químico que indicou perda de massa frente a reagentes, sendo o ácido clorídrico o mais agressivo, onde a rocha artificial obteve melhor resistência quando comparada a mármores in natura.

O processo de produção e purificação do ácido lático gera uma significativa produção de gesso (OJO; DE SMIDT, 2023). Neste sentido, há um potencial de aplicação deste resíduo sólido em compósitos, não só visando ganhos tecnológicos, mas também a um alinhamento com os princípios da economia circular, ao desviar o gesso dos aterros sanitários e incorporá-lo em materiais compósitos (OWA *et al.*, 2023). O gesso tem demonstrado um notável potencial como agente de reforço em compósitos poliméricos. Este é capaz de aumentar à adesão em metais, bem como a sua tolerância à ambientes agressivos (DUBEY; MISHRA; SHARMA, 2021; STAROKADOMSKY, 2018; STAROKADOMSKY *et al.*, 2020).

Contudo, ao incorporar gesso como material particulado em conjunto com a resina epóxi, é fundamental reconhecer a potencial discrepância na natureza intrínseca desses elementos. A resina selecionada para esta análise, por exemplo, exibe uma característica hidrofóbica, enquanto o gesso é notório por sua propensão à hidrofilia (JEYRANPOUR; ALAHYARIZADEH; ARAB, 2015). Adicionalmente, é crucial ressaltar que a presença de umidade nos particulados pode exercer um impacto nas propriedades mecânicas, uma vez que as amostras tendem a manifestar um maior volume de vazios quando associadas a uma fase dispersa mais saturada. Dentro dessa perspectiva, o presente estudo tem como

objetivo principal a avaliação da resistência ao impacto de compósitos reforçados com gesso e resina epóxi (MEHDIKHANI *et al.*, 2019).

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

A matriz polimérica utilizada é neste trabalho pelo sistema epóxi SQ 1005/SQ 3131 (DGEBA/DETA).

O resíduo analisado nesse estudo é conhecido como gesso industrial. Este é proveniente da produção de ácido lático na empresa Corbion (Purac) em Campos dos Goytacazes, região Fluminense do estado do Rio de Janeiro. Após serem submetidos a 24 horas de secagem a 70°C em uma estufa, os particulados foram posteriormente selecionados utilizando uma peneira de 100 mesh, sendo utilizado apenas os particulados que passaram nesta.

Cinco corpos de prova foram confeccionados, em moldes de silicone, com formulações de 0, 5, 10, 15 e 20% de particulado, sendo utilizado o phr igual a 16. Após a cura, os corpos de prova retornaram a estufa para pós cura durantes 2,5 horas em 70°C.

Após o processo de cura, os corpos de prova foram lixados até atingir as dimensões de 10x12,5x60mm e fresados para criação de um chanfro, onde posteriormente foram submetidos ao ensaio de impacto Izod, em conformidade com a norma ASTM D256-10, por meio de uma máquina de ensaio de impacto PANTEC Pendulum modelo XC-50, de acordo com a Imagem 1 (ASTM, 2023).

Figura 1: Máquina de ensaio de impacto PANTEC Pendulum modelo XC-50.

Visto que a ASTM D256 possibilita expressar os resultados em duas unidades, J/m e kJ/m², fora calculado o valor da resistência ao impacto em (kJ/m²) de maneira convencional, dividindo a energia pela área, e resistência ao entalhe por meio da multiplicação do valor supracitado pelo valor médio da largura dos corpos de prova. Isto foi realizado visando proporcionar maior precisão e comparabilidade de resultados.

Visando mensurar a quantidade de vazios nas amostras, foi realizada uma análise de densificação através da relação entre densidade real e teórica. A densidade real foi obtida através do método de Arquimedes, de acordo com a norma ASTM D792, e a densidade teórica foi calculada pelas regras das misturas. Para a regra das misturas, levou-se em consideração a densidade da resina, que também foi obtida através de Arquimedes e a densidade dos particulados de gesso, que foi obtida por meio de Picnometria, segundo a norma ISO 1183-1 (ASTM, 2020; ISO, 2019).

Com o objetivo de discernir disparidades estatisticamente significativas na resistência ao impacto das formulações em consideração, foi implementada uma análise de variância (ANOVA), juntamente com o teste de Tukey, para discernir grupos que manifestam divergências estatísticas entre si. O nível de significância estatística foi estabelecido em 5%. Estas estimativas estatísticas foram executadas utilizando o software PAST, seguindo a metodologia preconizada pelo algoritmo desenvolvido por Copenhagen e Holland (1988).

3 I RESULTADOS

A Tabela 1 exibe os resultados dos ensaios de impacto, juntamente com os respectivos desvios padrões que foram obtidos neste estudo.

Quantidade de particulados	Resistência ao entalhe (J/m)	Resistência ao impacto (kJ/m²)
0%	2,037 ± 0,075	25,46 ± 0,93
5%	1,554 ± 0,194	19,42 ± 2,42
10%	1,655 ± 0,071	20,68 ± 0,89
15%	1,777 ± 0,134	22,22 ± 1,68
20%	2,02 ± 0,129	25,25 ± 1,62

Tabela 1. Resultados dos ensaios de impacto.

A Figura 2 exibe de forma gráfica a Tabela 1, onde ser observa uma redução de resistência alcançada com uma incorporação em até 15% de resíduos, sendo esta significativa segundo a ANOVA. Por outro lado, a formulação com uma proporção maior de partículas (20%) apresenta um aumento médio de resistência, embora não atinja significância estatística devido a variância que fora observada.

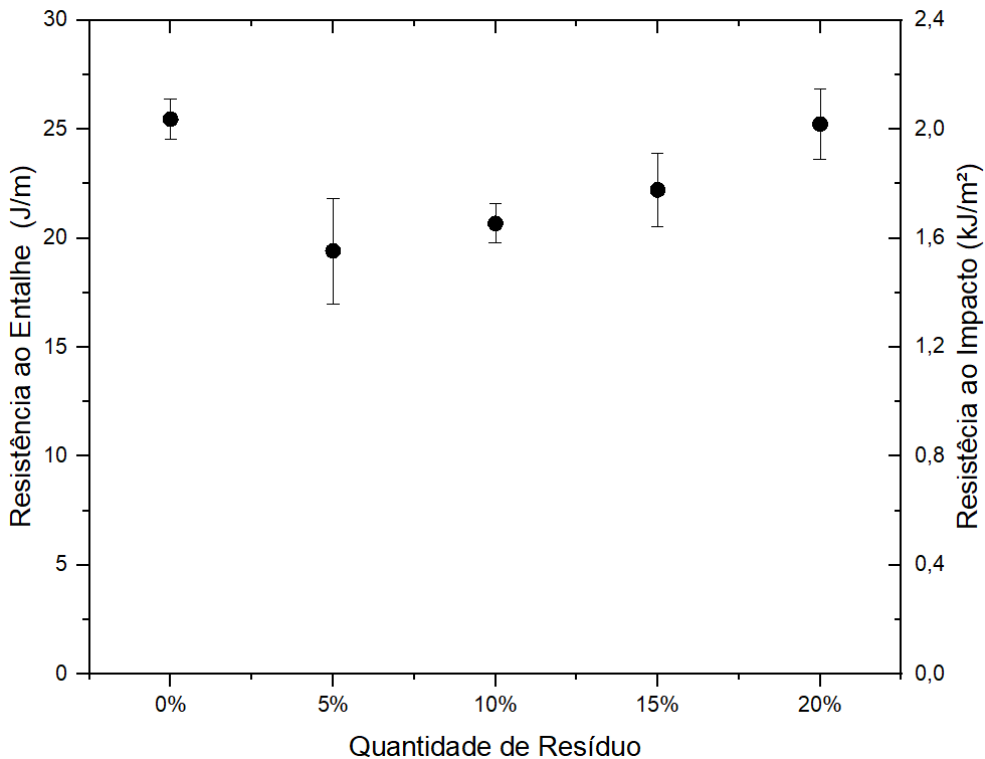



Figura 2. Resultados dos ensaios de impacto.

A perda de resistência pode ser explicada pela natureza frágil do gesso que é observada na literatura (BOCCARUSSO *et al*., 2021). Não obstante, a inserção de particulados tende a elevar a viscosidade do sistema epóxi e proporcionar uma maior formação de vazios nos compósitos (LUO *et al*., 2021; RUEDA *et al*., 2017). Tais vazios podem ensejar em ganhos de resistência ao impacto, fazendo o material ter um comportamento menos frágil (COLLIAS; BAIRD; BORGGREVE, 1994; SISODIA *et al*., 2019).

Isto é evidenciado pela densificação dos compósitos que pode ser observada na Figura 3. Nesta é observado que a inserção de particulados tende a diminuir a densificação do compósito, sendo observada uma tendência de que isto se intensifique com a adição de particulados. O que corrobora com o que fora observado na literatura anteriormente (LUO *et al*., 2021; RUEDA *et al*., 2017).

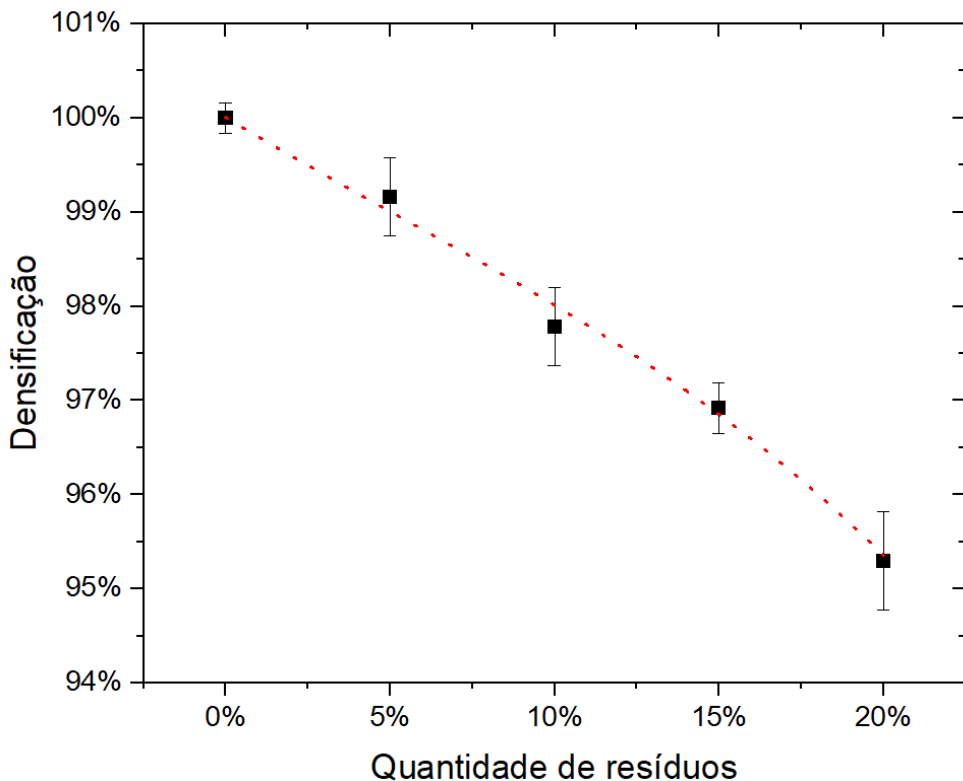



Figura 3. Densificação dos corpos de prova em função da quantidade de resíduos.

Neste sentido, há a presença de dois fatores, sendo inicialmente prevalecido o efeito de fragilização ocasionado pela inserção dos particulados de gesso (reduzindo a resistência) e posteriormente prevalecido o efeito dos vazios que tornaram o material mais dúctil.

4 I CONCLUSÕES

Por meio deste trabalho pode-se concluir que caso utilizado em baixa quantidade, à natureza frágil do gesso, acarreta perda de absorção de energia durante o ensaio de impacto. Não obstante, caso este resíduo seja incorporado em quantidade maiores, é possível observar um pequeno ganho de resistência média.

Acrescenta-se ainda que, o fator de demandar mais resíduo para confecção do compósito não é negativo, vistos as vantagens ambientais e econômicas decorrentes da substituição parcial da resina epóxi por um resíduo industrial.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D256-23e1: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. West Conshohocken: **ASTM International**, 2023. DOI: 10.1520/D0256-23E01

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, D792-20 Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. **West Conshohocken.** ASTM International, 2020. DOI: 10.1520/D0792-20

BOCCARUSSO, L.; MOCERINO, D.; DURANTE, M.; IUCOLANO, F.; MINUTOLO, F. M. C.; LANGELLA, A. Recyclability Process of Gypsum Reinforced with Hemp Fabrics: Impact and Flexural Behaviour. **ESAFORM 2021**, 2021. DOI: 10.25518/esaform21.4044

COLLIAS, D. I.; BAIRD, D. G.; BORGGREVE, R. J. M. Impact toughening of polycarbonate by microcellular foaming. **Polymer**, v. 35, n. 18, p. 3978–3983, 1994. DOI: 10.1016/0032-3861(94)90283-6

COPENHAVER, M. D.; HOLLAND, B. Computation of the distribution of the maximum studentized range statistic with application to multiple significance testing of simple effects**. Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 30, n. 1, p. 1-15, 1988. DOI: 10.1080/00949658808811082

COSTA, E.A.S.; GOMES, M.L.P.M.; SOBRINHO, L.N.; MONTEIRO, S.N.; RODRÍGUEZ, R.J.S; FONTES, C.M.V. Produção e caracterização de rocha artificial a partir de chamote e brita em matriz epoxídica. **Anais do Congresso Anual da ABM**. São Paulo: Editora Blucher, 2017. DOI: 10.5151/1516-392X-30549

DUBEY, S. C.; MISHRA, V.; SHARMA, A. A review on polymer composite with waste material as reinforcement. **Materials today: proceedings**, v. 47, p. 2846–2851, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.611.

ELHOUSARI, A. M.; RASHAD, M.; ELSHEIKH, A. H; DEWIDAR, M. The effect of rubber powder additives on mechanical properties of polypropylene glass-fiber-reinforced composite**. Mechanical sciences**, v. 12, n. 1, p. 461–469, 2021. DOI: 10.5194/ms-12-461-2021

FIORE, V.; DI BELLA, G.; SCALICI, T; Valenza, A. Effect of plasma treatment on mechanical and thermal properties of marble powder/epoxy composites**. Polymer composites**, v. 39, n. 2, p. 309–317, 2018. DOI: 10.1002/pc.23937

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 1183-1: Plastics — Methods for determining the density of non-cellular plastics — Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method. Genebra: **ISO**, 2019.

JEYRANPOUR, F.; ALAHYARIZADEH, Gh; ARAB, B. Comparative investigation of thermal and mechanical properties of cross-linked epoxy polymers with different curing agents by molecular dynamics simulation**. Journal of molecular graphics & modelling**, v. 62, p. 157–164, 2015. DOI: 10.1016/j.jmgm.2015.09.012

LUO, X.; GAO, J.; LIU, C; HE, Z. Effects of polymers on workability and early microstructure of gypsum-based materials**. ACI materials journal**, v. 118, n. 5, p. 29–34, 2021. DOI: 10.14359/51732929

MEHDIKHANI, M.; GORBATIKH, L.; VERPOEST, I; LOMOV, V. S. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. **Journal of composite materials**, v. 53, n. 12, p. 1579–1669, 2019. DOI: 10.1177/0021998318772152

ÓHAISEADHA, C.; QUINN, G.; CONNOLLY, R.; CONNOLLY, M.; SOON, W. Energy and climate policy—an evaluation of global climate change expenditure 2011–2018. **Energies**, v. 13, n. 18, p. 4839, 2020. DOI: 10.3390/en13184839

OJO, A. O.; DE SMIDT, O. Lactic acid: A comprehensive review of production to purification. **Processes**, v. 11, n. 3, p. 688, 2023. DOI: 10.3390/pr11030688

OWA, A. F.; ADESINA, F.; BODEDE, O. R.; OLUPONA, M. D.; FAPETU, O. F.; AKINNIBI, B. O. Mechanical properties of granite / pulverized coconut shell particulate hybrid reinforced epoxy composites. **UNIOSUN Journal of Engineering and Environmental Sciences**, v. 5, n. 1, 2023. DOI: 10.36108/ujees/3202.50.0161

RUEDA, M. M.; AUSCHER, M. C.; FULCHIRON, R.; PÉRIÉ, T.; MARTIN, G.; SONNTAG, P.; CASSAGNAU, P. Rheology and applications of highly filled polymers: A review of current understanding. **Progress in polymer science**, v. 66, p. 22–53, 2017. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2016.12.007

SILVA, N. G.; CORTAT, L. I.; ORLANDO, D.; MULINARI, D. R. Evaluation of rubber powder waste as reinforcement of the polyurethane derived from castor oil. **Waste management**, v. 116, p. 131–139, 2020. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.032

SISODIA, S. M.; BULL, D. J.; GEORGE, A. R.; GAMSTEDT, E. K.; MAVROGORDATO, M. N.; FULLWOOD, D. T.; SPEARING, S. M. The effects of voids in quasi-static indentation of resin-infused reinforced polymers. **Journal of composite materials**, v. 53, n. 28–30, p. 4399–4410, 2019. DOI: 10.1177/0021998319858024

STAROKADOMSKY, D. L. Physic-mechanical properties and nano-microstructure of epoxy-composites with cement, chalk and gypsum. **Kompozity i Nanostruktury**, v.10, n. 1(37), p. 39–51, 2018. Disponível em: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35085460. Acesso em: 15 ago. 2023.

STAROKADOMSKY, D., RASSOKHIN, D., ISHCHENKO, A., SIGAREVA, N., & RESHETNYK, M. Strength and chemical resistance of composites based on epoxy resins, filled with gypsum in the original and water-hardened forms. **Eastern-European journal of enterprise technologies**, v. 5, n. 12(107), p. 73–80, 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.214399

TISSERANT, A.; PAULIUK, S.; MERCIAI, S.; SCHMIDT, J.; FRY, J.; WOOD, R.; TUKKER, A. Solid waste and the circular economy: A global analysis of waste treatment and waste footprints: Global analysis of solid waste and waste footprint. **Journal of industrial ecology**, v. 21, n. 3, p. 628–640, 2017. DOI: 10.1111/jiec.12562

VELASCO, D.C.R.; LOPES, F.P.D.; SOUZA D.; LOPERA, H.A.C.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F. Evaluation of composites reinforced by processed and unprocessed coconut husk powder. **Polymers**, v. 15, n. 5, p. 1195, 2023. DOI: 10.3390/polym15051195

ZHANG, F.; ZHANG, L.; YASEEN, M.; HUANG, K. A review on the self-healing ability of epoxy polymers. **Journal of applied polymer science**, v. 138, n. 16, p. 50260, 2021. DOI: 10.1002/app.50260

CAPÍTULO 3

SÍNTESE DE ADSORVENTES A PARTIR DE REJEITO DE CAULIM AMAZÔNICO

Data de submissão: 09/06/2023 *Data de aceite: 01/09/2023*

Antônio Lucas Alcantara Modesto
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém– Pará
http://lattes.cnpq.br/4728233493323449

Rian Cristian Douro Amorim
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/8957051851081842

Alex Gabriel Oliveira Ruivo
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará

Mailson Batista de Vilhena
Universidade federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/0383588164193085

Dilson Nazareno Pereira Cardoso
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/1711061955509303

Josiel Lobato Ferreira
Universidade Federal do Pará, faculdade de Engenharia química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/0187722217624180

Bruno Marques Viegas
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Biotecnologia (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/1196600058247902

Deibson Silva da Costa
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais (Campus Ananindeua)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/1521124351431087

José Antônio Silva da Souza
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/6157348947425968

Emanuel Negrão Macêdo
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/8718370108324505

Diego Cardoso Estumano
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Biotecnologia (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/5521162828533153

Emerson Cardoso Rodrigues
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/7459428211048580

RESUMO: No desenvolvimento deste trabalho, as zeólitas foram produzidas a partir do rejeito de caulim que possui como fonte principal de silício e alumínio, o produto foi submetido a ensaios de adsorção com intuito de analisar seu potencial como adsorvente em um sistema úmido e fechado. A sintetização foi realizada em condições hidrotermais em reator dinâmico. Com base nos resultados obtidos, observa-se que no procedimento experimental desenvolvido com o rejeito de caulim, inicialmente calcinado a 700 °C por 2 horas, no qual se realizou a reação em meio alcalino a 100 ºC por 30 minutos obtendo a zeólita como fase predominante no produto de síntese. As análises de DRX e MEV comprovaram a cristalinidade e morfologia do material zeolítico formado (zeólita A e sodalita), os ensaios de adsorção demonstram boa capacidade adsortiva, porém com a necessidade de um tratamento adicional para evitar a rápida saturação e utilizar em aplicações mais viáveis como no tratamento de efluentes industriais.
PALAVRAS-CHAVE: resíduo, zeólita, teor adsortivo.

SYNTHESIS OF ADSORBENTS FROM AMAZON KAOLIN WASTE

ABSTRACT: In the development of this work, zeolites were produced from kaolin waste, which has silicon and aluminum as its main source. The product was subjected to adsorption tests in order to analyze its potential as an adsorbent in a humid and closed system. The synthesis was carried out under hydrothermal conditions in a dynamic reactor. Based on the results obtained, it is observed that in the experimental procedure developed with the kaolin waste, initially calcined at 700 °C for 2 hours, in which the reaction was carried out in an alkaline medium at 100 °C for 30 minutes, obtaining the zeolite as phase predominant in the synthesis product. XRD and SEM analyzes confirmed the crystallinity and morphology of the formed zeolite material (zeolite A and sodalite), the adsorption tests demonstrate good adsorptive capacity, but with the need for additional treatment to avoid rapid saturation and use in more viable applications as in the treatment of industrial effluents.
KEYWORDS: residue, zeolite, adsorptive content.

1 I INTRODUÇÃO

O Pará possui grande destaque no Brasil por ter um dos mais importantes depósitos de caulim a nível internacional e ser o principal distrito brasileiro de produção de caulim para a indústria de papel, no qual o processamento desse material gera uma quantidade considerável de rejeitos, que causam problemas para a região amazônica, pois, grandes áreas são desmatadas para sua disposição, porém existem diversos trabalhos produzidos que visam estabelecer rotas de aplicação para esses materiais (Costa, 2009; Maia et al. 2019; Menezes et al. 2017).

Por possuir diversas impurezas, é de extrema importância o processo de beneficiamento, a fim de padronizar o caulim de acordo com as especificações de mercado e aplicações industriais (Sousa et al, 2020). Desse modo, além de ser abundante e de baixo custo, é um ótimo material de partida para realização de sínteses de material zeolítico (Breck, 1974).

Os materiais zeolíticos possuem diversas aplicações, pois, possuem microporos formados por causa de sua estrutura de rede tridimensional aberta ordenada em canais de dimensões moleculares, podendo ainda ter em sua organização estrutural um excesso de cargas negativas em virtude da substituição isomórfica de Si^{4+} por Al^{3+}, dessa forma esse material é utilizado como peneira molecular em processos de adsorção, troca iônica e catálise (Dyer, 1988; Sousa et al, 2020).

Os objetivos deste trabalho foram, utilizar o rejeito de caulim para síntese de zeólitas em condições hidrotermais, caracterizar o material em suas diferentes etapas para comprovar a eficácia do procedimento experimental e aplicar em testes de adsorção.

2 I METODOLOGIA

2.1 Calcinação do Rejeito de Caulim e Síntese Hidrotermal Para Obtenção Do Material Zeolítico

Foi realizada a secagem do rejeito de caulim na estufa a 110 °C durante 24 horas e logo após foi é a cominuição deste material no moinho de bolas durante 20 minutos. Em seguida, a calcinação do durante 2 horas a 700 °C no forno elétrico de alta temperatura foi feita para que ocorresse a desidroxilação assim obtendo o metacaulim. Na produção das zeólitas, utilizou-se uma solução de hidróxido de sódio (5 molar), que reagiu com o metacaulim, o que representa uma relação Al/Na igual a 0,57, o reator de síntese, um balão de fundo redondo de 2 litros com três juntas no qual fica o condensador, um agitador (configurado para 700 rpm) e o termopar onde a manta estava ligada para alcançar e estabilizar uma temperatura de aproximadamente 100 °C, com 30 minutos de reação ocorreu o processo de cristalização assim como visto em Rodrigues (2019), o produto é removido do reator e submetido ao processo de filtração a fim de neutralizar o pH.

2.2 Caracterização do Material de Partida e Produto

Difração de Raios X realizada no laboratório instituto de geociências da UFPA campus Belém, sendo as análises feitas no Difratômetro de Raios X modelo Empyrean da PANalytical, tubos de raios-X cerâmico de anodo de Co ($K_{\alpha 1}$= 1,789010 Å), foco fino longo, filtro K_{β} de Fe, detector PIXCEL3D-Medpix3 1x1, no modo scanning, com voltagem de 40 kV, corrente de 35mA. Fenda divergente: 1/4° e anti-espalhamento: 1/2°, máscara: 10 mm.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), realizada no labMEV do Matcam na UFPA campus Belém, sendo os dados obtidos pelo microscópio de bancada, da Hitachi, modelo TM3000. As imagens foram geradas por elétrons secundários com voltagens de 5 kV.

2.3 Aplicação do Material Zeolítico em Teste de Adsorção

No processo de adsorção foram utilizados aproximadamente 5g de material zeolítico formado (zeólita A e sodalita), calcinadas à 400 °C por 2 horas em forno mufla, logo em seguida, isoladas em sistema fechado em presença de água (ilustrado na Figura 1) para poder analisar o teor de umidade adsorvido na amostra durante nove dias, as pesagens do adsorvente foram feitas em duplicatas nos intervalos de 2, 4, 6, 8, 24, 48, 72, 120, 168 e 216 horas.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Difração de Raios X do Material de Partida (Antes e Depois do Tratamento Térmico) e Produto

A Figura 1 mostra que o material de partida antes da calcinação tem em sua constituição o argilomineral caulinita e uma pequena presença de quartzo, observa-se também através da Figura 2 que após a calcinação o material possui apenas quartzo, comprovando que houve a desidroxilação obtendo o metacaulim, através da perda de cristalinidade do rejeito de caulim com a ausência dos picos de caulinita caracterizando um material amorfo que contém principalmente sílica em sua composição (Hildebrando, 2012; Sousa et al, 2020; Maia et al, 2007).

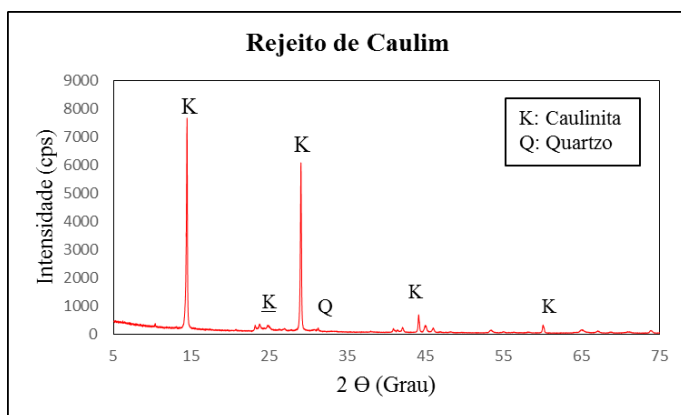



Figura 1 – Difratograma do rejeito de caulim.

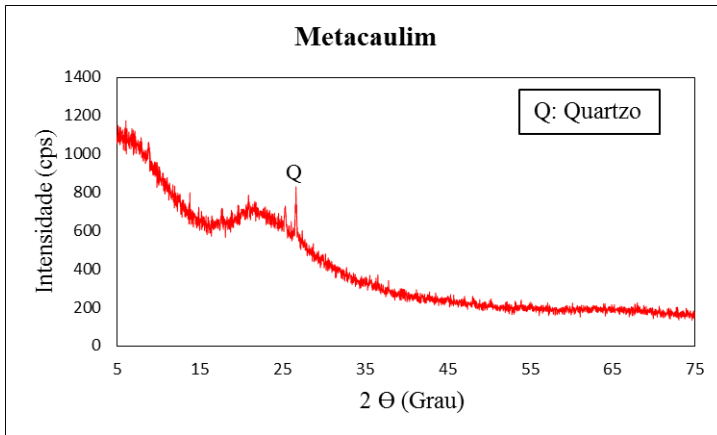



Figura 2 – Difratograma do metacaulim.

A Figura 3 apresenta picos de zeólita A e sodalita identificados como “ZA” e “HS” no difratograma do material após o processo de síntese hidrotermal a aproximadamente 100 °C durante 30 minutos. É possível visualizar nas curvas de difração como fase predominante a zeólita A e em menor proporção a sodalita (Hildebrando, 2012; Sousa et al, 2020).

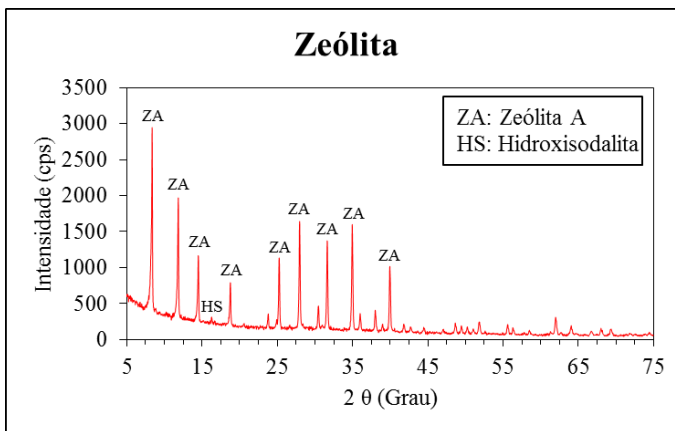



Figura 3 – Difratograma do produto de síntese.

3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura do Material de Partida (Antes e Depois do Tratamento Térmico) e Produto

Percebe-se que na Figura 4 o material de partida, antes da calcinação, é constituído por varias partículas aglomeradas com empilhamento tipo booklets, de morfologia pseudo-hexagonal, características dos cristais de caulinita (Maia et al, 2007).

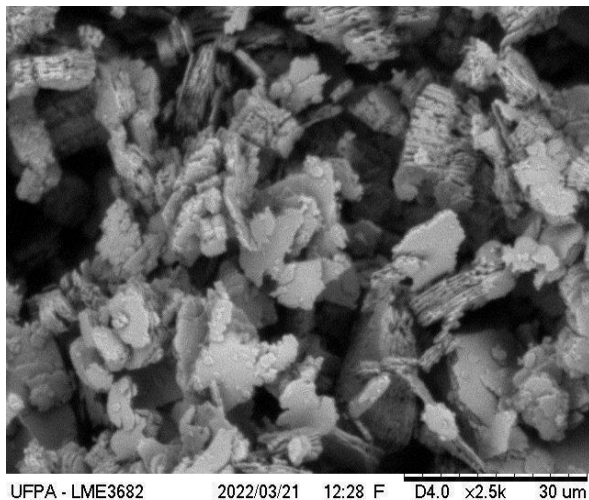



Figura 4 – Micrografia do rejeito de caulim.

Na Figura 5 o metacaulim, obtido após a calcinação do rejeito a 700 ºC em um intervalo de 2 horas mostra grande aglomeração de partículas, mas com uma alteração no empilhamento através da redução de folhas empacotadas por causa da quebra dos cristais de caulinita, permanecendo com a morfologia pseudo-hexagonal (Hildebrando, 2012b).

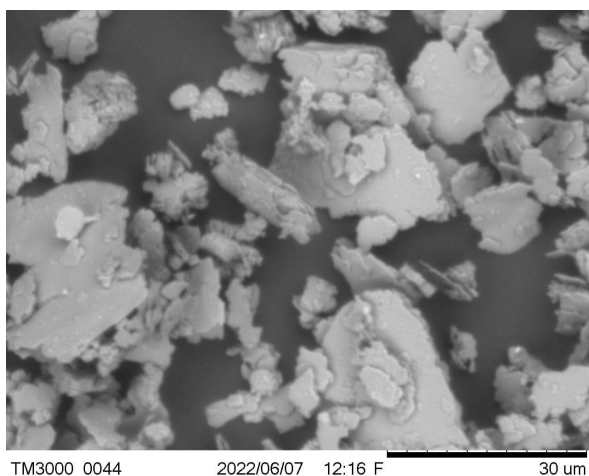



Figura 5 – Micrografia do metacaulim.

De acordo com a figura 6, pode-se visualizar a morfologia cúbica da zeólita tipo A e também a presença (em menor quantidade) de cristais esféricos (sodalita) do material sintetizado em meio alcalino (Rodrigues, 2019).

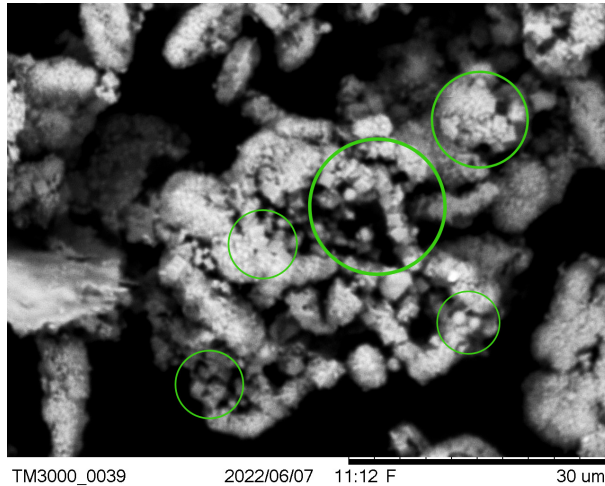



Figura 6 – Micrografia do material zeolítico.

3.3 Adsorção de Umidade

Como visto na Figura 7 percebesse que inicialmente o material adsorve uma grande quantidade de umidade em um intervalo de duas horas, logo após vemos uma redução gradativa para os três próximos pontos, que tiveram o mesmo intervalo de tempo, isso se deve a granulometria do material que possuía uma grande superfície de contato com o ambiente úmido, ao ganhar umidade o material vai diminuindo sua superfície de contato. Desse modo, mesmo com redução da área de contato do material, ainda se pode visualizar um perfil curvilíneo ascendente na Figura 7, representando o aumento acumulativo de umidade após os nove dias (216 horas), quase saturando tendo 5,58% de umidade média de umidade adsorvida, necessitando de um intervalo maior de tempo para atingir saturação.

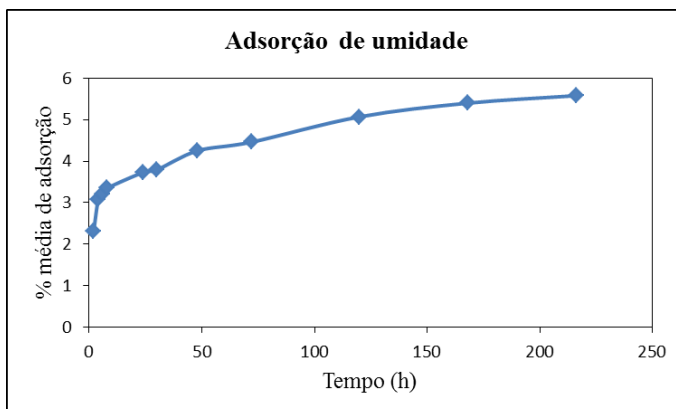



Figura 8 – Média da adsorção do material zeolítico.

4 I CONCLUSÃO

Uma das principais fases cristalizadas foi na obtenção do material zeolítico, obtendo-se a partir do rejeito de caulim, por usa vez podendo através de um rejeito aplicar em algo viável se fez verdade após a síntese ser realizada através de reações hidrotérmicas em meio alcalino com uma temperatura aproximada de 100 ºC por um período de 30 minutos, comprovados pelas análises mineralógicas e morfológicas. Os testes de adsorção apresentaram uma ótima eficácia inicial, por causa de sua granulometria, entretanto ao perder contato com o sistema úmido ocorreu um déficit na adsorção comparado no primeiro intervalo de duas horas. Dessa forma, se tratar o material para que ele não sature rapidamente e tenha uma maior eficácia em tratamentos de efluentes, a zeólita produzida pode ser a solução de diversos problemas ambientais causados por efluentes líquidos de indústrias e esgotos.

REFERÊNCIAS

BRECK, D.W. "**Zeolite molecular sieves: structure, chemistry, and use**", John Wiley Sons, New York, 1974.

COSTA, M. L.; SOUSA, D. J. L.; ANGÉLICA, R. S. "**The contribution of lateritization processes to the formation of the kaolin deposits from eastern Amazon**". J. South Am. Earth Sci. Vol.27, 2009, pp. 219-234.

DYER, A. "**An Introduction to Zeolite Molecular Sieves**". John Wiley & Sons, New York, 1988.

HILDEBRANDO, E. A. "**Síntese de zeólita do tipo faujasita utilizando rejeito de caulim da Amazônia como fonte de silício e alumínio: Aplicação como adsorvente**", Tese de doutorado – Universidade de S. Paulo, S. Paulo, 2012.

MAIA, A.A.B.; DIAS, R.N.; ANGÉLICA, R.S.; NEVES, R.F. **Influence of an aging step on the synthesis of zeolite NaA from Brazilian Amazon kaolin waste**. Journal of Materials Research and Technology, v. 8, p. 2924-2929, 2019.

MAIA, A. A. B. et al. "**Utilização de rejeito de caulim da Amazônia na síntese da zeólita A**". Cerâmica, Vol.53, 2007, p. 319-324.

MENEZES, R.A.; PAZ, S.P.A.; ANGÉLICA, R.S. et al. **Synthesis of ultramarine pigments from Na-A zeolite derived from kaolin waste from the Amazon**. Clay Minerals, v. 52, p. 83- 95, 2017.

RODRIGUES, E. C. "**Produção de Material Zeolítico a partir de Caulim da Amazônia em Escala Semi Piloto: Aplicação na Adsorção de Cobre**". Belém, 2019. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Pará, PRODERNA/ITEC-UFPA.

SOUSA, B.; REGO, J.; BRASIL, D.; MARTELLI, M. **Síntese E Caracterização de Zeólita Tipo Sodalita Obtida A Partir De Resíduo De Caulim**. Cerâmica, Vol.66, 2020, pp. 404-412.

REVISÃO DA LITERATURA SOBRE A USINABILIDADE DO AÇO AISI H13 SOB DIFERENTES MEIOS LUBRIRREFRIGERANTES

Data de aceite: 01/09/2023

Carlos Eduardo Borsoi Rheinheimer
Aluno de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Rafael Talini Lorenzi
Aluno de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

André João de Souza
Professor Doutor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Porto Alegre, RS

RESUMO: O AISI H13 é um aço-ferramenta para trabalho à quente ligado ao cromo-molibdênio que apresenta alta resistência ao desgaste, ao choque térmico, à fadiga térmica e ao amolecimento pelo calor. São utilizados principalmente na fabricação de moldes e matrizes de forjamento, fundição e extrusão devido à sua capacidade de manter a dureza em temperaturas elevadas, com suficiente tenacidade. O seu alto teor de carbono, associado aos demais elementos de liga, lhe permite alta temperabilidade. Quando tratado termicamente, o H13 forma carbonetos globulares que expõem repetidamente a ferramenta de corte durante a usinagem a elevadas tensões térmicas e mecânicas. Tais dificuldades direcionam para a aplicação de fluidos de corte em abundância visando reduzir o atrito nas interfaces ferramenta-peça e ferramenta-cavaco, remover a energia térmica que surge na zona de corte, e expulsar os cavacos gerados. Por outro lado, o avanço tecnológico de máquinas e ferramentas tem possibilitado a "usinagem dura" aplicando métodos alternativos de lubrirrefrigeração em substituição ao fluido em abundância motivados por aspectos econômicos e ambientais. Assim, esta revisão da literatura visa apresentar as vantagens e limitações da aplicação desses métodos alternativos (a seco, com mínima quantidade de lubrificante, refrigerado a gás, e por criogenia) na usinagem do AISI H13 endurecido.

PALAVRAS-CHAVE: usinabilidade do AISI H13, meios lubrirefrigerantes, materiais de difícil usinagem.

A LITERATURE REVIEW ON MACHINABILITY OF THE AISI H13 STEEL UNDER DIFFERENT LUBRICOOLING ENVIRONMENTS

ABSTRACT: AISI H13 is a chromium-molybdenum alloy steel with high wear resistance, high thermal shock resistance, high thermal fatigue resistance, and high heat softening resistance. This tool steel is mainly used to manufacture molds and dies applied on forging, casting, and extrusion due to its ability to maintain hardness at high temperatures with sufficient toughness. The high carbon content present in AISI H13 tool steels, associated with other alloying elements, allows their high hardenability. When heat-treated, H13 produce globular carbides that expose the cutting tool to high thermal and mechanical stresses during machining. Such difficulties encourage applying cutting fluid in abundance to reduce friction at the tool-workpiece and tool-chip interfaces, extracting the heat produced in the cutting zone, and removing the generated chips. On the other hand, technological advances in machine tools and cutting tools have enabled “hard machining” by applying alternative methods of lubricooling to replace the cutting fluid in abundance supported by economic and environmental aspects. Thus, this literature review aims to present the advantages and limitations of applying these alternative methods (dry, minimal quantity lubrication, gas cooling, and cryogenic cooling) in the machinability of hardened AISI H13.
KEYWORDS: Machinability of AISI H13 tool steels, lubricating media, hardness machine materials.

1 I INTRODUÇÃO

Aços da família “H” são aços para trabalho a quente, sendo o H11 o primeiro a ser desenvolvido para fabricação de moldes para fundição de alumínio.

O aço AISI H13 é um aço-ferramenta para trabalho a quente, do tipo cromo-molibdênio (Cr-Mo), utilizado principalmente para fabricação de moldes e matrizes devido a sua capacidade de manter a dureza em temperaturas elevadas, com resistência mecânica e tenacidade suficientes (Kumar e Chauhan, 2015).

O endurecimento do AISI H13 acontece por tratamento térmico de têmpera com revenimento ao ar, devido a sua elevada temperabilidade (Umbrello *et al.,* 2008). Essa característica se deve, além do alto teor de carbono, aos elementos de liga encontrados em sua composição. A presença de cromo propicia maior uniformidade das características mecânicas entre a superfície e o núcleo da peça, podendo atingir durezas de até 60 HRC, onde apresenta fase martensítica metaestável (Cardarelli, 2008).

Devido à alta dureza do AISI H13 e à formação de carbonetos globulares, a ferramenta de corte é repetidamente exposta a níveis extremamente elevados de tensões mecânicas e térmicas. A aplicação de fluido de corte em abundância é altamente utilizada, visando a redução do atrito entre peça-ferramenta e ferramenta-cavaco, a extração da energia térmica que surge na zona de corte, e a remoção dos cavacos (Bakar *et al.*, 2020).

Materiais endurecidos comumente apresentam baixa usinabilidade. No entanto, a usinagem realizada após tratamento térmico com o material já em sua dureza final evita

problemas decorrentes do tratamento térmico, como por exemplo variações dimensionais e empenamentos (Wang e Zheng, 2003).

A usinagem de materiais endurecidos afeta o mecanismo de formação do cavaco, sendo comum encontrar forças de usinagem mais altas para materiais de maior dureza (maior pressão específica de corte); no entanto, as áreas das seções transversais de corte utilizadas na usinagem são normalmente menores, fazendo com que as forças não sejam elevadas. Percebe-se ainda que a utilização de materiais com baixas condutividades térmicas resultam em maiores solicitações de usinagem, pois apenas uma pequena quantidade de energia térmica que surge na usinagem seja removida junto ao cavaco. Isso faz com que uma quantidade maior de calor seja absorvida pela ferramenta, reduzindo a sua vida (Klocke, 2011).

Os avanços tecnológicos das ferramentas de corte e conjuntos máquinas-ferramentas possibilitaram a usinagem de materiais endurecidos através de métodos alternativos. Processos de torneamento de materiais endurecidos vem substituído processos de retificação de forma econômica (Wang e Zheng, 2003). A aplicação de novos revestimentos tem resultado em melhorias significativas na vida das ferramentas de corte, possibilitando o estudo de fresamento a seco em altas de velocidades de corte (Fox-Rabinovich *et al.*, 2005), além de outros métodos de refrigeração.

A eliminação, ou ao menos a redução do uso de fluido lubrirrefrigerante é uma busca devido a pressões econômicas e ambientais, visando atender uma série de normas atualmente adotadas que contempla o controle e o descarte deste tipo de insumo. Além do custo gerado ao processo, o fluido é associado a uma série de doenças que podem acometer os colaboradores, doenças essas que podem ser respiratórias ou cutâneas, além do impacto ambiental devido ao seu descarte incorreto (Goindi e Sarkar, 2017).

Diante disso, o objetivo deste artigo é apresentar uma revisão concisa da literatura acerca das possibilidades da usinagem deste material utilizando diferentes métodos de aplicação de lubrirrefrigerantes ambientalmente amigáveis.

2 | USINAGEM A SECO DO AISI H13

A usinagem sem utilização de qualquer fluido lubrirefrigerante, denominada usinagem a seco, é considerada como ideal do ponto de vista econômico e ambiental. Uma vez que não há o custo envolvido com a aquisição e descarte deste insumo, bem como a eliminação do agente causador de doenças que afetam a saúde dos operadores. Por isso a busca pela usinagem a seco tem sido cada vez maior. Entretanto, sem o uso de fluído de corte, o excessivo aumento de temperatura causa o amolecimento do material da ferramenta, fazendo com que esta perca sua dureza, aumente a taxa de desgaste, e modifique a geometria de corte. Isso, por sua vez, aumenta as forças de usinagem e gera maiores deformações, que podem inclusive causar falhas repentinas da ferramenta. Além

disso, pode causar danos à superfície usinada. Por isso, a usinagem a seco tem sido implementada com sucesso em alguns poucos materiais e processos (Goindi e Sarkar, 2017).

2.1 Torneamento

O torneamento a seco tem sido o processo mais estudado para usinagem de materiais de difícil usinagem, onde busca-se com isso reduzir a necessidade de retificação pós beneficiamento.

Ghani *et al*. (2008) realizaram estudos para torneamento a seco de AISI H13 temperado (dureza de 56 HRC) com usando insertos de PCBN. Foram utilizadas duas velocidades de corte distintas para realização dos experimentos. A profundidade de corte e o avanço e foram mantidos constantes e iguais a a_p = 0,2 mm e f = 0,172 mm/rev., respectivamente. Os parâmetros experimentais, na Tab. (1). Os dados obtidos experimentalmente foram utilizados em conjunto com análise de elementos finitos para estabelecer relações entre a temperatura na zona de corte e o desgaste da ferramenta, uma vez que influencia fortemente nas forças de usinagem e na integridade superficial da peça. Após cada passe de 85 mm de comprimento, a aresta de corte e os cavacos gerados foram analisados em microscópio óptico para determinar a área da seção transversal do cavaco e assim calcular a espessura do cavaco gerado.

Experimento Nº	Velocidade de corte vc (m/min)	Comprimento de corte l (mm)	Nº de passes
1	144,26	85	1
2	144,26	170	2
3	144,26	255	3
4	144,26	340	4
5	288,52	85	1
6	288,52	170	2
7	288,52	255	3

Tabela 1. Parâmetros de corte no torneamento de AISI H13 com dureza de 56 HRC (Ghani *et al.* 2008)

A Figura (1) monstra a influência da espessura do cavaco na área de contato entre o cavaco e a ferramenta e a transferência de calor na interface. Supondo que 90% do trabalho realizado na usinagem seja convertido em energia térmica, cerca de ¾ desta energia é transformada devido ao cisalhamento durante a formação do cavaco (zona primária) e ¼ por meio do atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta (zona secundária) e pelo do atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a peça de trabalho (zona terciária).

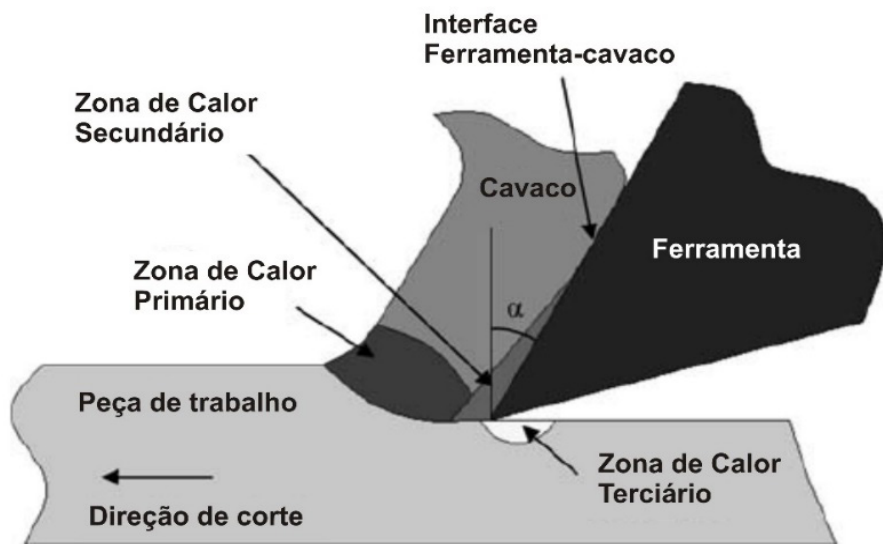



Figura. 1. Geração de calor na usinagem ortogonal (Ghani *et al.* 2008).

O desgaste da ferramenta foi medido ao final de cada passe, mostrando-se menores para as condições com menor v_c (menor calor gerado durante o corte). A evolução dos desgastes máximos de flanco pode ser vista na Fig. (2). Identificou-se alta incidência de lascamentos nos flancos dos insertos. O desgaste de cratera também foi identificado, sendo mais acentuado para altas velocidades de corte.

As forças de usinagem quando v_c = 144,26 m/min permaneceram praticamente constates, aumentando a partir do segundo passe e permanecendo constante para o restante dos testes, com exceção do passe 3, que apresentou um aumento temporário das forças de corte (provavelmente devido a alguma inclusão de maior dureza), e o passe 4, que exibiu redução gradativa das forças devido ao lascamento da aresta, que diminuiu o contato original com a peça. A temperatura apresentou aumento de forma oscilatória no início do processo, sendo essa oscilação gradualmente eliminado com o tempo; isso acontece durante o aquecimento inicial, pois o coeficiente de transferência de calor da ferramenta é muito baixo, e por isso o calor é transferida desta forma até que uma temperatura constante e com menores oscilações, seja atingida. A conclusão dos autores é que a vida da ferramenta pode ainda ser melhorada se utilizados materiais com menores condutividades térmicas, inibindo assim o calor que é transmitido para a ferramenta, o que poderia tornar viável a usinagem a seco do AISI H13.

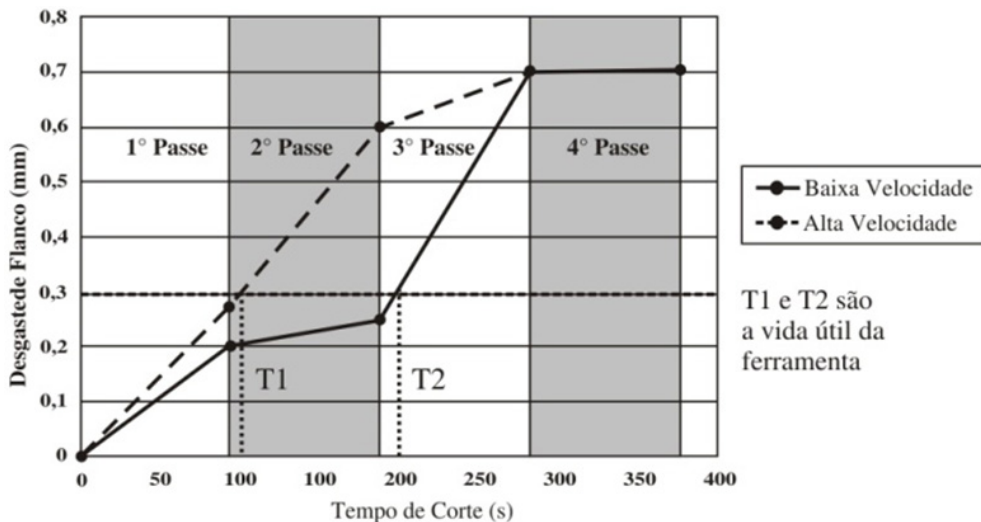



Figura. 2. Desgastes máximos de flanco no torneamento a seco de AISI H13 com dureza de 56 HRC, (Ghani *et al.* 2008).

2.2 Fresamento HSM

Com o avanço tecnológico, o fresamento de topo em altas velocidades de corte (HSM – *High-Speed Machining*) tornou-se um processo de fabricação de baixo custo, com produção de peças de alta precisão dimensional e qualidade superficial. Inicialmente utilizou-se o fresamento aço rápido em ligas de alumínio; com o passar o tempo, foram realizados estudos em materiais com usinabilidade cada vez menor. As principais vantagens da utilização de HSM são alta produtividade, baixa força de usinagem (seção de corte reduzida) e boa dissipação térmica. Entretanto, muitas vezes se associa HSM com desgastes excessivos de ferramenta, uso de máquinas-ferramentas de alto custo e necessidade de utilização de materiais avançados para ferramentas de corte e revestimentos (Fallböhmer *et al.*, 2000).

Fallböhmer *et al.* (2000) analisaram o fresamento a seco HSM do AISI H13 com dureza de 46 HRC utilizando fresas com insertos de metal-duro com diferentes revestimentos (TiN, TiCN, TiAlN[1] e AlTiN[2]) e fresas com insertos de PCBN a 300, 450 e 800 m/min de velocidade de corte. A ferramenta que apresentou maior tempo de vida foi o inserto com revestimento de TiN atingindo fim de vida após a usinagem de uma área de 750 cm². Além disso, todos os insertos de metal-duro tiveram vida superior aos insertos de PCBN, possivelmente devido à menor tenacidade. A vida da ferramenta foi ligeiramente maior para velocidades de corte menores, mas as vidas foram também expressivas para v_c = 450

1. A designação "TiAlN" é usada para revestimentos de nitreto de Ti-Al onde o teor de alumínio atômico de Al é menor ou igual a 50%, normalmente de cor marrom opaca.
2. A designação "AlTiN" é usada para revestimentos de nitreto de Ti-Al onde o teor de alumínio atômico de Al é maior do que 50%, normalmente de cor preta.

m/min, tornando esse parâmetro como ideal para estas condições. Outra característica notada foi que os insertos de PCBN apresentaram maior vida para v_c = 800 m/min, pois estas apresentam maior dureza a quente. A Figura (3) mostra os resultados encontrados. Os autores concluíram que a usinagem de AISI H13 com durezas próximas às ensaiadas em HSM não só são possíveis de serem realizadas, como são economicamente viáveis.

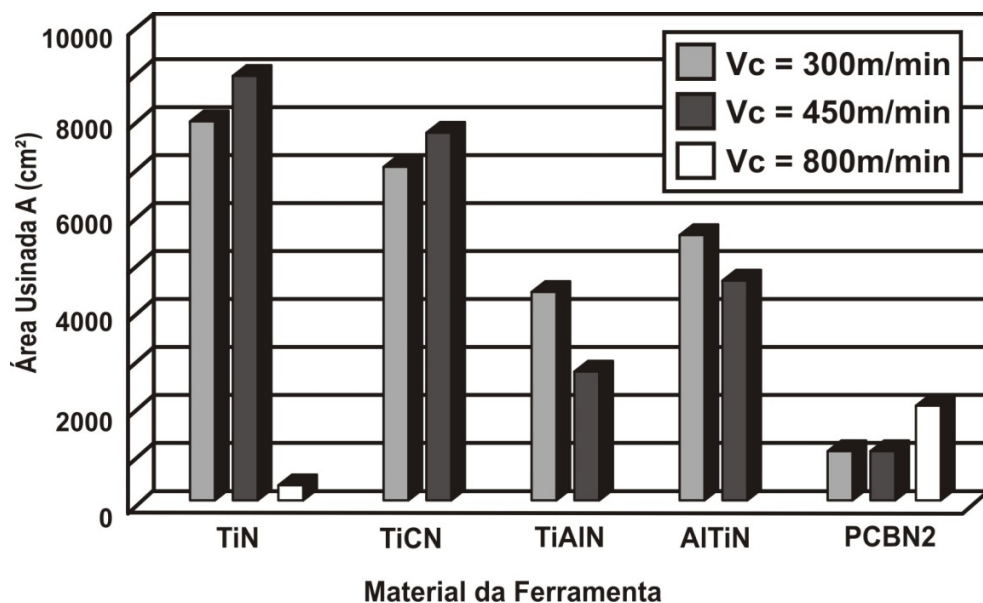



Figura 3. Área de material usinado vs. material da ferramenta (Fallböhmer *et al*. 2000).

Outro estudo em HSM foi feito por Fox-Rabinovich *et al*. (2005) em que os autores analisaram fresamento utilizando fresas esféricas inteiriças com revestimentos PVD de TiAlN (50% Al + 50 Ti), TiAlCrN (25% Ti + 65% Al + 10% Cr) e TiAlCrN (10% Ti + 70% Al + 20% Cr), com diferentes teores de elementos constituintes, no fresamento a seco em aço AISI H13 endurecido (50 HRC) com velocidade de corte v_c = 200 m/min, avanço por dente f_z = 0,06 mm/dente, profundidade de corte radial a_e = 5 mm e profundidade de corte axial a_p = 0,6 mm. A Figura (4) mostra os valores de desgaste máximo de flanco (VB_{max}) medido nas ferramentas após 30 m usinados. Observou-se que as ferramentas revestidas com TiAlCrN (10% Ti + 70% Al + 20% Cr) apresentaram os menores valores de VB_{max}, sendo quase duas vezes superior ao TiAlN (50% Ti + 50% Al). Para os autores, a existência de cromo na composição química do revestimento promoveu a criação de um tribofilme que reduziu o atrito nas interfaces peça-ferramenta e ferramenta-cavaco. Analisando-se as ferramentas através de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) observou-se que esse revestimento promoveu a redução do mecanismo de desgaste por oxidação (a formação de Cr_2O_3 impede que a superfície entre em contato com a atmosfera, prevenindo a oxidação).

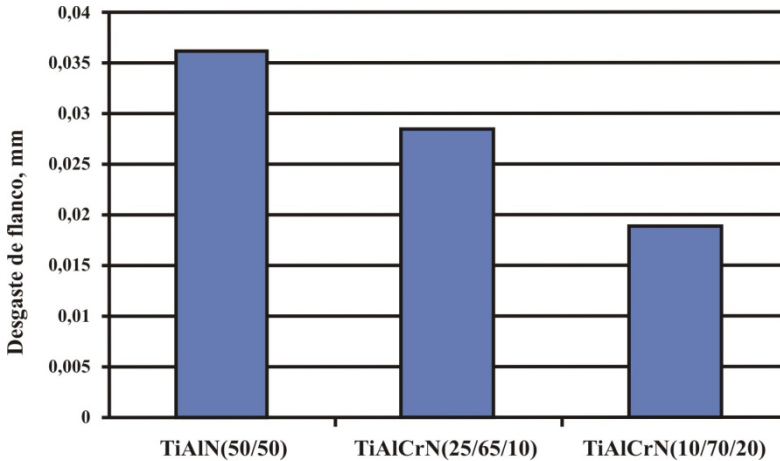



Figura. 4. Desgaste máximo de flanco vs. revestimento de ferramenta após 30 m de usinagem do AISI H13 endurecido a 50 HRC (Fox-Rabinovich *et al.* 2005).

3 I MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE NA USINAGEM DO AISI H13

A usinagem a seco tem se mostrado como o grande objetivo para uma usinagem ambientalmente amigável. Entretanto, para materiais de difícil corte, ela ainda não é viável, sendo muitas vezes impraticável. Por outro lado, os fluidos de corte em abundância são uma importante ferramenta para o aumento da produtividade, seja através de efeito refrigerante, que reduz a temperatura de corte nas interfaces pelo efeito lubrificante, que reduz o atrito da ferramenta com o cavaco e a peça; e ainda há o efeito de remover o cavaco da zona de corte. Nesse contexto, a usinagem com mínima quantidade de lubrificante (MQL) pode ser tornar uma opção de estudo.

Diversos estudos apresentam o uso de método de lubrirefrigeração MQL satisfatórios para fresamento, torneamento furação e retificação, inclusive apresentando melhorias perceptíveis para a maiorias destes processos. Os resultados mais expressivos podem ser vistos quando comparados com método de aplicação de fluido abundante. Pode-se concluir que o uso de MQL não se mostra não apensar como uma melhoria ambiental, mas também, em muitos casos, com uma melhoria da usinagem em si, embora ainda haja diferentes estudos neste campo (Sharma et al., 2015).

Se o objetivo principal é realizar a lubrificação, utiliza-se o sistema é MQL; se tanto o resfriamento quanto a lubrificação são necessários, aplica-se o MQCL com o uso de tubo de vórtice. Em operações MQCL, o lubrificante usado é comumente óleo puro, mas em algumas aplicações usam-se emulsão ou água (Dixit et al., 2012).

3.1 Furação

Brandão *et. al* (2011) realizaram o processo de furação do aço AISI H13 com dureza de 55 HRC utilizando brocas helicoidais inteiriças de metal duro revestidas com

TiAlN. O processo foi realizado utilizando três meios lubrirrefrigerantes: a seco, MQL e por inundação. Os testes foram realizados utilizando a broca nova; posteriormente, foram realizados outros testes em um novo corpo de prova até o desgaste de flanco atingir 0,2 mm e novamente foi realizado o teste com a broca desgastada para registro de temperaturas. Para a realização das medidas de temperatura, termopares foram inseridos na peça a 0,8 mm, 3,3 mm e 5,8 mm da parede do furo em distâncias da entrada da broca de 3 mm (T0), 7 mm (T1) e 11 mm (T2). Os resultados das medições de temperatura apresentados na Figura (5). Os valores mais altos são encontrados na condição a seco, sendo a condição por inundação a que apresentou menores temperaturas. De acordo com os autores, o melhor para brocas que apresentam já um certo nível de desgaste, é a condição abundante, visto que as temperaturas se mantiveram na mesma faixa das brocas novas. Utilizando como base os valores encontrados no termopar T1 na posição de 0,8 mm (Dist_0,8) no teste utilizando MQL, verificam-se temperaturas muito mais elevadas nas brocas desgastadas ao serem comparadas com as brocas novas, demonstrando com isso que este método não foi suficiente para manter as temperaturas próximas em ambos os níveis.

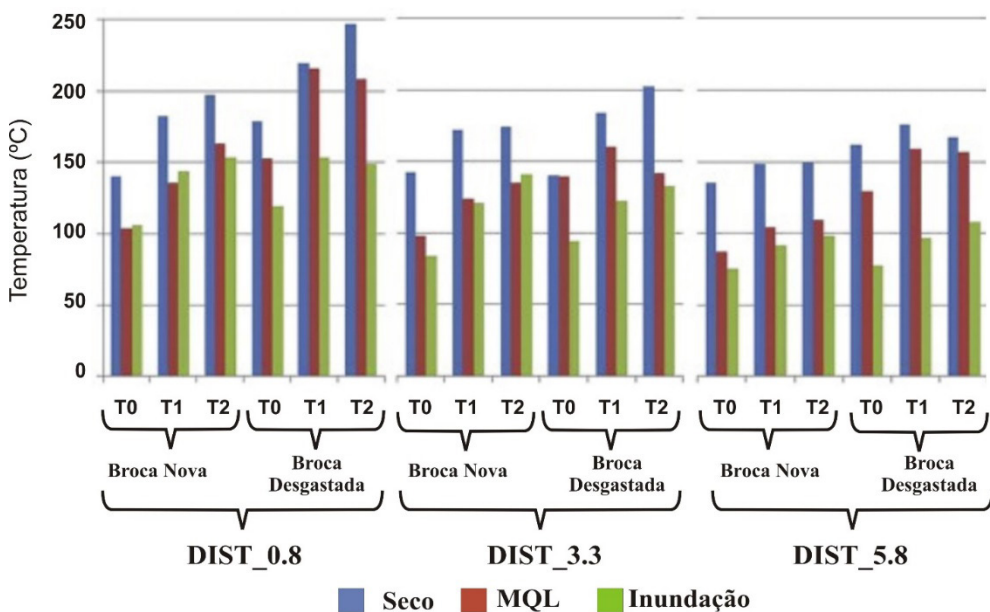



Figura 5. Resultados da temperatura para os testes com broca nova e desgastada na furação de AISI H13 nas condições a seco, MQL e por inundação (Brandão *et al.* 2011).

3.2 Fresamento

Mulyadi *et al.* (2015) realizaram o fresamento frontal HSM em aço AISI H13 utilizando fresas inteiriças de metal-duro com 8 mm de diâmetro revestidas com TiAlN sob diferentes meios lubrirrefrigerantes: a seco, com fluido abundante de base mineral (vazão de 1,8 L/h) e com método MQL (vazão de 29,9 mL/h). Os parâmetros de corte foram mantidos constantes e iguais a v_c = 315 m/min, f = 0,05 mm/rev. a_p = 1,5 mm e a_e = 1,5 mm. Foram realizados 11 passes consecutivos com comprimentos de corte de 100 mm cada. A medição de VB_{max} foi registrada por microscópio óptico, adotando como critério de fim de vida da ferramenta VB_{max} ³ 0,3 mm. Além disso, foram monitorados os consumos de energia elétrica através da potência para cada condição de lubrirrefrigeração.

A Figura (6) monstra as curvas de vida encontradas pelos autores. A maior taxa de desgaste ocorreu na usinagem a seco, que atingiu fim de vida após 15,3 min de usinagem. No caso da usinagem com MQL e com fluido abundante (inundação), a vida foi de 25,0 min e 29,7 min, respectivamente. Notou-se que até 23,3 min de usinagem (VB_{max} ≤ 0,235 mm) as taxas de desgaste para ambos foram próximas e estatisticamente iguais.

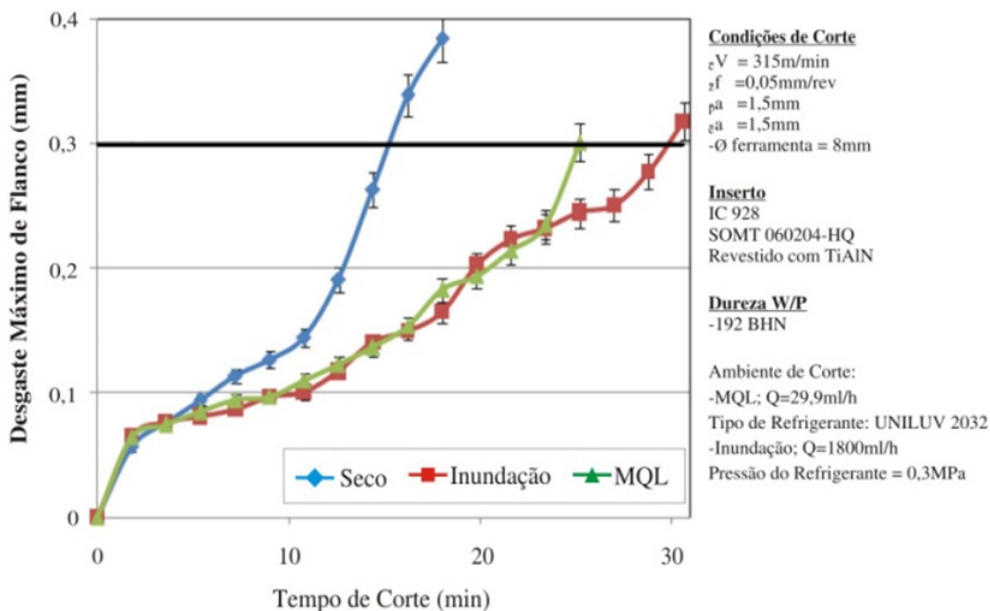



Figura 6. Desgaste de flanco na usinagem de AISI H13 nas condições a seco, MQL e com fluido em abundância (Mulyadi *et al.* 2015).

A Figura (7) mostra os valores de potência consumida. Como era esperado pelos autores, a usinagem a seco foi a que consumiu menores quantidades de potência, uma vez que não havia demanda de energia da bomba. Notou-se ainda a potência de corte na usinagem com MQL muito próxima da usinagem a seco, e a usinagem por inundação a

que apresentou maior consumo de potência. Por considerar que a vida da ferramenta com MQL e com fluido em abundância foram relativamente próximas. Para autores o conjunto de fatores econômicos e ambientais devem definir qual método preferível.

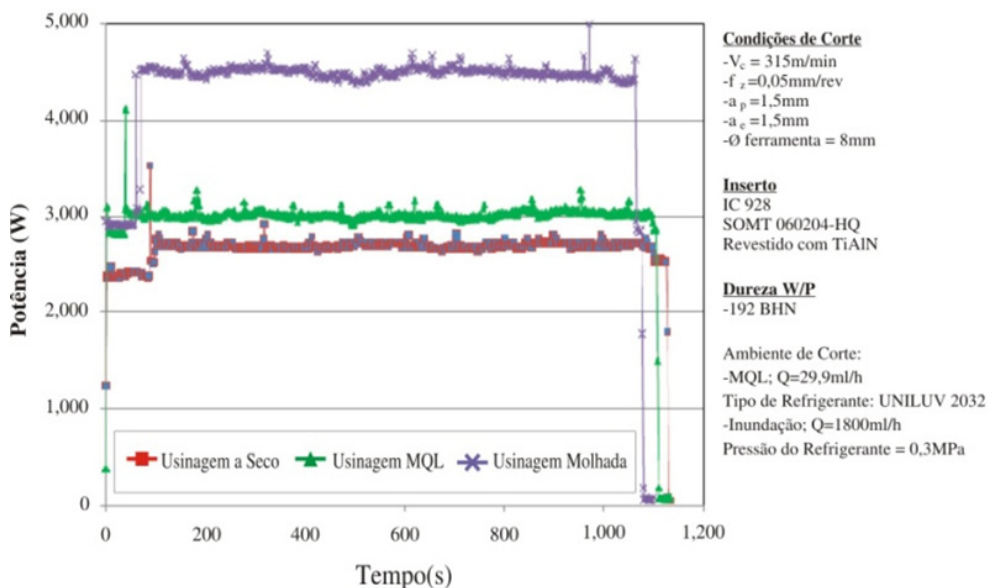



Figura 7. Potência de corte na usinagem de AISI H13 nas condições a seco, MQL e com fluido em abundância (Mulyadi *et al*. 2015).

Manimaran e Ross (2020) realizaram o fresamento de uma liga de aço AISI H13 comparando o método MQCL com o corte a seco e com emulsão 1:20 em abundância. O MQCL utilizou óleo de rícino (vegetal) em conjunto com dióxido de carbono (CO_2) aplicado a uma vazão de 3,6 l/h e pressão de 2 bar. Os autores analisaram os resultados obtidos em relação à temperatura de corte, ao desgaste da ferramenta, à morfologia do cavaco, à microdureza e a rugosidade média (R_a). Constataram que o MQCL reduziu respectivamente a temperatura e o desgaste de flanco em relação ao corte a seco em 52% e 54%, e em relação à usinagem inundada em 40% e 18%. Ao analisarem os cavacos, observaram que houve redução no ângulo de cisalhamento, aumentando a espessura do cavaco e facilitando sua quebra devido a lubrificação e resfriamento superiores. Ao investigar a superfície usinada, o MQCL gerou uma microdureza 6% mais alta em relação à usinagem a seco e 2% maior que na com fluido em abundância. Com relação à rugosidade, a condição MQCL gerou os menores valores de R_a e a condição a seco os maiores. Além disso, maiores velocidades de corte (v_c) produziram menor rugosidade em todas as condições lubrirrefrigerantes, havendo pequena influência do avanço (f) que apresentou valores ligeiramente maiores para um avanço 20% maior. A Figura (8) mostra as rugosidades encontradas.

(a) *f* = 0,10 mm/rev **(b) *f* = 0,12 mm/rev**

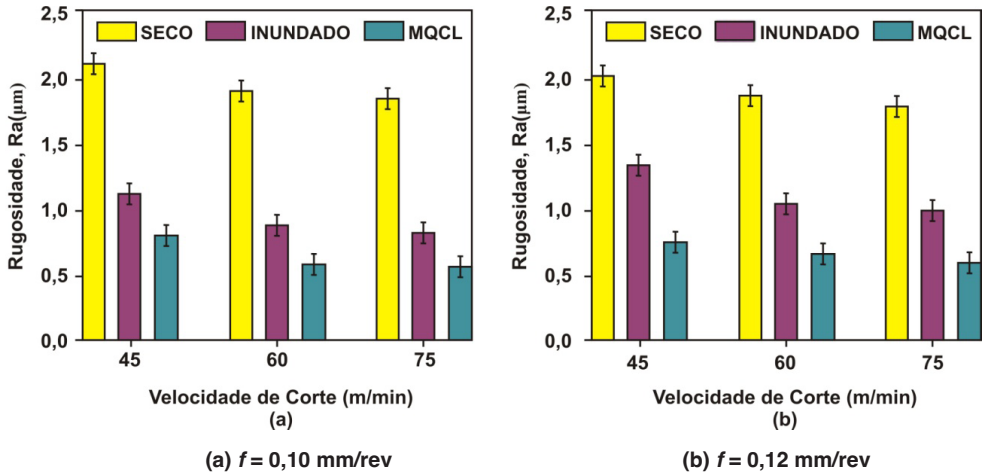



Figura 8. Valores de R_a para diferentes velocidades de corte e avanço (Manimaran e Ross, 2020).

4 I REFRIGERAÇÃO A GÁS NA USINAGEM DO AISI H13

A utilização de fluido gasoso causa menores prejuízos ambientais, uma vez que não há geração de qualquer resíduo com uso deste insumo. O ar comprimido é tido como a alternativa economicamente mais viável, uma vez que o mesmo está prontamente disponível na maioria das empresas. Outros gases como oxigênio (O_2), dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2) e argônio (Ar) sob altas pressões também podem ser aplicados isoladamente ou em conjunto com o ar comprimido. Um fluido gasoso pode ser aplicado de várias formas, com vários ângulos de aplicação: quando aplicado diretamente na superfície de saída (face) da ferramenta, reduz o atrito desta com o cavaco; quando aplicado na superfície de folga (flanco) refrigera a interface ferramenta-peça. Ao ser aplicado através de um tubo de vórtice, este reduz a temperatura do gás e amplia sua capacidade refrigerante, podendo chegar a ser 20ºC menor (Sarma, 2009).

4.1 Torneamento

Sarma (2009) realizou torneamento de AISI H13 com dureza de 46 HRC utilizando corte a seco e refrigeração com ar comprimido. Para os testes foram utilizadas ferramentas de CBN revestidas com TiN variando os parâmetros de corte (v_c = 125 a 215 m/min f = 0,05 a 0,25 mm/rev. e a_p = 0,06 a 0,40 mm). Foram considerados as forças de usinagem, o desgaste de flanco da ferramenta e a rugosidade da superfície usinada. As forças de avanço e de corte, em geral, são maiores para o torneamento com refrigeração a ar. A Figura (9) mostra as imagens da progressão do desgaste do flanco da ferramenta no torneamento a seco e refrigerado a ar para v_c = 125 m/min, f = 0,16 mm/rev e a_p = 0,16 mm. Cada imagem foi obtida após a usinagem de 200 mm. Nota-se nas imagens que o desgaste de flanco foi maior para condição a seco em comparação com a refrigerada a ar. Isso mostra

que a refrigeração com ar comprimido tem influência direta na vida da ferramenta. Isso foi evidenciado pelos autores para altas velocidades de corte, onde há tendência de elevação da temperatura de usinagem. Observou-se ainda na condição refrigerada a ar que não houve desgaste de cratera e formação de aresta postiça de corte (APC). No entanto, o resfriamento a ar não influencia significativamente a rugosidade da superfície usinada e não auxilia na redução das forças de corte e avanço. Portanto, o método parece ser uma opção ecologicamente correta e econômica para torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de CBN.

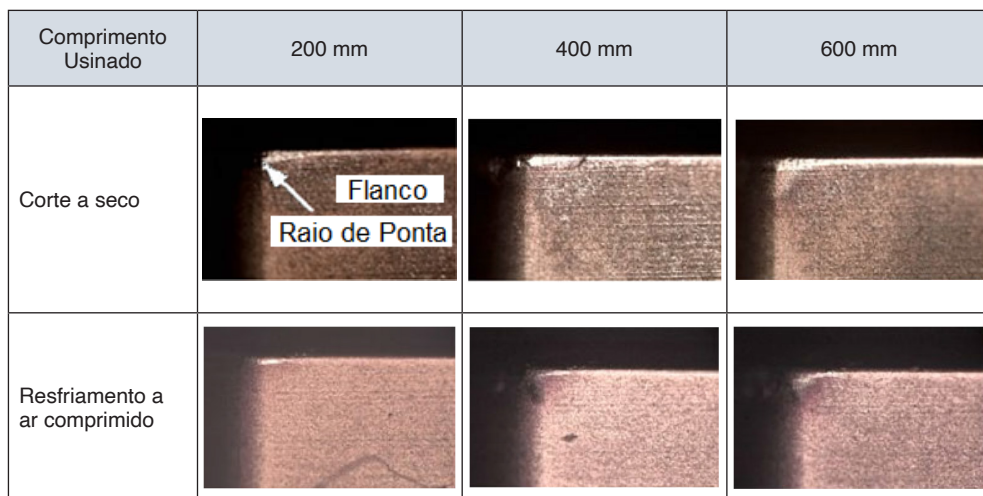



Figura 9. Progressão do desgaste de flanco da ferramenta durante o torneamento a seco e com ar comprimido do AISI H13 com ferramenta de CBN (Sarma, 2009).

5 I REFRIGERAÇÃO POR CRIOGENIA

Refrigeração criogênica em processos de usinagem envolve o uso de gases liquefeitos como nitrogênio (LN_2), dióxido de carbono (LCO_2), hélio (LHe) e argônio (LAr), em baixíssimas temperaturas (abaixo de 120 K). Pode-se utilizar esse artifício como parte do tratamento térmico da ferramenta, melhorando as propriedades do material que a compõe, denominado crio-processamento, ou como fluido de corte propriamente dito, a fim de refrigerar a zona de corte, reduzindo o atrito e afastando o cavaco (Shokrani *et al.*, 2013). A usinagem criogênica visa aumentar a vida da ferramenta, melhorar o acabamento superficial da peça e reduzir as forças de usinagem (Bakar *et al.*, 2020).

Usinagem criogênica é um termo utilizado para denominar processos de usinagem submetidos a uso de gases liquefeitos super frios, direcionados área de usinagem com objetivo de resfriar a zona de corte. Há, entretanto, uma ressalva importante para utilização de refrigeração criogênica: as baixíssimas temperaturas da criogenia também podem alterar as propriedades superficiais do material da peça usinada, geralmente aumentando

a dureza e elasticidade. Aços de baixo carbono, por exemplo, que são materiais dúcteis, com tendência a aderir a ferramenta de usinagem, podem vitrificar – de forma similar a materiais poliméricos – ao atingir temperaturas inferiores a de transição vítrea, reduzindo significativamente a usinabilidade do material. A redução da temperatura também diminuía condutividade térmica do material, podendo resultar em um comportamento imprevisível durante a usinagem (Shokrani *et al.*, 2013).

5.1 Fresamento

A geometria da aresta de corte e os parâmetros de corte afetam significativamente o desempenho da ferramenta a estabilidade do processo de usinagem, sendo reconhecidos por influenciar as forças de usinagem e a temperatura de corte, além de ter impacto sobre a vida da ferramenta e a qualidade da superfície usinada. Três formas geométricas fundamentais são comumente empregadas quando se trata da usinagem de materiais endurecidos: arredondadas, afiadas e chanfradas. Com esta abordagem, Bakar *et al.* (2020) estudaram a influência do raio de arredondamento da aresta de corte (r_β) na rugosidade média (R_a) gerada por fresamento HSM a seco e com LN_2 do aço AISI H13 endurecido (52 HRC) utilizando fresas inteiriças de metal-duro. A Tabela (2) mostra o planejamento experimental realizado pelos autores. Inicialmente realizou-se os experimentos 8 com usinagem a seco com velocidade de corte constante em vc = 200 m/min. Em seguida, a lubrificação criogênica com LN_2 foi aplicada nos experimentos 1 e 8, os quais corresponderam aos maiores e menores tempos de vida da ferramenta (Fig. 10).

Experimento Nº	Avanço f_z (mm/dente)	Profundidade de corte axial a_p (mm)	Raio de arredondamento de aresta r_β (mm)
1*	0,03	0,1	0,03
2	0,03	0,1	0,05
3	0,03	0,2	0,03
4	0,03	0,2	0,05
5	0,06	0,1	0,03
6	0,06	0,1	0,05
7	0,06	0,2	0,03
8*	0,06	0,2	0,05

*Fresamento com refrigeração criogênica (LN_2)

Tabela. 2. Planejamento experimental (Bakar ***et al.*** 2020).

Todos os experimentos de vida da ferramenta (Fig. 10) foram interrompidos quando $VB_{max} \geq 0,3$ mm. Nota-se que o uso do menor r_β (0,03 mm), combinado com baixos níveis de a_p e f_z, gerou a menor taxa de desgaste. A maior vida de ferramenta no corte a seco foi de 4,43 min, enquanto que para aplicação de LN_2, a vida alcançou 8,65 min (aumento de

95%). Segundo os autores, isso pode ter sido devido à grande redução de temperatura na zona de corte e a diminuição do atrito nas interfaces.

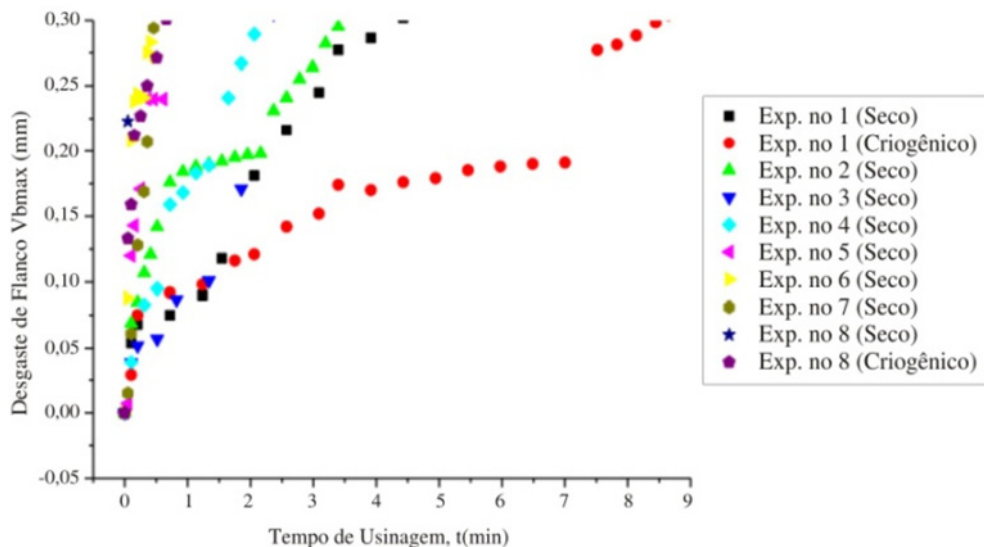



Figura 10. Curva de vida da ferramenta no fresamento do AISI H13 a seco e com LN2 (Bakar *et al.* 2020).

A Figura (11) mostra os valores de rugosidade média (R_a) obtidos. Observa-se que um menor r_β (0,03 mm) aliado a baixos níveis de a_p e f_z geram melhor acabamento na superfície fresada. Além disso, essa rugosidade diminuí com aplicação de criogenia (até 7,59% menor) pois há uma tendência de que haja menos adesão de material à ferramenta, o que resulta em menos marcas (arranhões) na superfície.

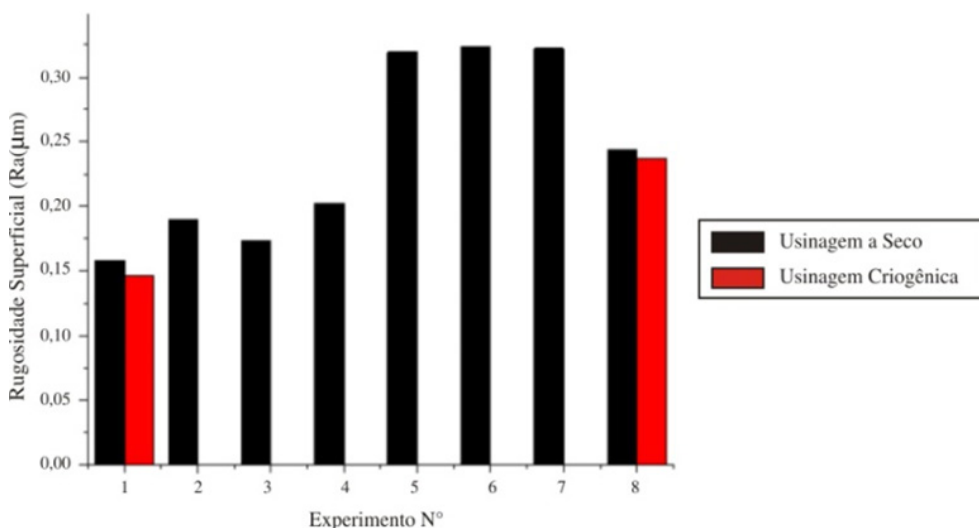



Figura 11. Rugosidade no fresamento do AISI H13 a seco e com LN_2 (Bakar *et al.* 2020).

A Tabela (3) resume estes resultados. Essas técnicas estão se tornando cada vez mais viáveis de serem utilizadas e mais adequadas à usinagem verde. Vale citar o método por mínima quantidade de lubrificação (MQL), o qual se apresenta como mais proeminente em relação aos demais métodos.

Autores	Procedimento de Usinagem	Meio Lubrirrefrigerante	Resultados
Ghani et al. (2008)	Torneamento	Seco	Os menores desgastes da ferramenta foram encontrados nas condições com menor velocidade de corte devido ao menor calor gerado.
Fallböhmer et al. (2000)	Fresamento	Seco	Todos os insertos de metal-duro tiveram vida superior aos insertos de PCBN. Maior tempo de vida foi encontrado com insertos de metal-duro com revestimento de TiN.
Fox-Rabinovich et al. (2005)	Fresamento	Seco	Os menores valores de desgaste máximo de flanco foram observados nas ferramentas revestidas com TiAlCrN (10/70/20)
Brandão et al. (2011)	Furação	Seco, MQL e Abundância	Os melhores resultados foram encontrados ao utilizar o método de resfriamento por inundação
Mulyadi et al. (2015)	Fresamento	Seco, MQL e Abundância	Maior desgaste da ferramenta na usinagem a seco e maior consumo de potência na usinagem abundante.
Manimaran e Ross (2020)	Fresamento	Seco, MQCL e Abundância	Menores temperaturas e desgaste de flanco foram obtidos com o método MQCL, quando comparados com o corte a seco e a usinagem inundada.
Sharma (2009)	Torneamento	Seco e Ar Comprimido	Na condição a seco ocorreu maior desgaste de flanco, existência de desgaste de cratera e formação de APC, que não foi notada na usinagem refrigerada a ar.
Bakar et al. (2020)	Fresamento	Seco e Criogênico.	Aumento na vida da ferramenta de 95% utilizando LN_2 ao comparar com o fresamento a seco.

Tabela 3. Resumo dos resultados encontrados

6 | CONCLUSÃO

O artigo sintetiza estudos promissores de diferentes métodos de lubrirrefrigeração para a usinagem do aço AISI H13. Conclui-se que essa liga pode se enquadrar como um material de difícil usinagem, o que torna o processo sem aplicação de fluido em abundância bastante desafiador. Entretanto, diversos trabalhos aplicando métodos alternativos de lubrirrefrigeração foram desenvolvidos e apresentaram resultados satisfatórios com relação à vida das ferramentas, temperaturas de corte, forças de usinagem e qualidades superficiais.

Dessa forma é possível afirmar que a usinagem de AISI H13 é possível de ser realizada com métodos alternativos de aplicação de fluido lubrirefrigerante em detrimento a utilização de fluido abundante e que existe uma tendência de que esses métodos sejam ainda aprimorados. Demonstra que outros materiais de difícil usinagem possam ser submetidos a condições semelhantes.

Analisando os estudos revisados, percebe-se que ainda existe campo para estudo no que se refere a métodos de lubrirrefrigerantes mais amigáveis para usinagem de AISI H13, principalmente furação profunda e processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida. Além disso, há oportunidades de estudos em fluidos de corte de base vegetal em substituição a fluidos de base mineral, que são potencialmente mais agressivos.

REFERÊNCIAS

Bakar, H. N. A., Ghani, J. A., Haron, C. H. C., 2020. "Influence of rounded cutting-edge radius and machining parameters on surface roughness and tool wear in milling AISI H13 steel under dry and cryogenic machining", Jurnal Tribologi, v. 24, p. 52-64.

Brandão, L. C., Coelho, R. T., Lauro, C. H., 2011. "Contribution to dynamic characteristics of the cutting temperature in the drilling process considering one dimension heat flow" Applied Thermal Engineering, Volume 31, Issues 17–18, 2011. p. 3806-3813,

Dixit, U. S., Sarma, D. K., Davim, P. J., 2012. Environmentally friendly machining, Springer, New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2308-9.

Cardarelli, F., 2008. Materials Handbook 2ª ed., Tucson: Springer, 1365p.

Fallböhmer, P., Rodríguez, C. A., Özel, T., Altan, T., 2000. "High-speed machining of cast iron and alloy steels fordie and mold manufacturing", Journal of Materials Processing Technology, v. 98, p. 104-115.

Fox-Rabinovich, G. S., Yamomoto, K., Veldhuis, S. C., Kovalev, A. I., Dosbaeva, G. K., 2005. "Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions", Surface & Coatings Technology, v. 200, p. 1804-1813.

Ghani, M. U., Abukhshim, N. A., Sheikh, M. A.,.2008. "An investigation of heat partition and tool wear in hard turning of H13 tool steel with CBN cutting tools", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.39, p. 874-888.

Goindi, G. S., Sarkar, P., 2017. "Dry machining: A step towards sustainable machining e Challenges and future directions", Journal of Cleaner Production, v. 165, p. 1556-1571.

Klocke, F., 2011. "Manufacturing Processes 1: Cutting". RWTH Edition, Springer, New York.

Kumar, P., Chauhan, S. R., 2015. "Machinability Study on Finish Turning of AISI H13 Hot Working Die Tool Steel With Cubic Boron Nitride (CBN) Cutting Tool Inserts Using Response Surface Methodology (RSM)", Arabian Journal for Science and Engineering, v. 40, p. 1471-1485.

Manimaran, G., Ross, K. N. S., 2020. "Surface Behavior of AISI H13 Alloy Steel Machining under Environmentally Friendly Cryogenic MQL with PVD-Coated Tool," Journal of Testing and Evaluation 48, no. 4 (July/August 2020): 3269–3280. https://doi.org/10.1520/JTE20180130

Mulyadi, I. H., Balogun, V. A., Mativenga, P. T., 2015. “Environmental performance evaluation of different cutting environments when milling H13 tool steel”, Journal of Cleaner Production, v.108, p. 110-120.

Sharma, V. S., Singh, G., Sorby, K., 2015. “A Review on Minimum Quantity Lubrication for Machining Processes”, Materials and Manufacturing Processes, v. 30, p. 935-953.

Sarma, D. K., 2009, “Experimental study, neural network modelling and optimization of environment – friendly air-cooled and dry turning process”, Guwahati/India, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Guwahati, 237p.

Shokrani, A., Dhokia, V., Muñoz-Escalona, P., Newman, S.T., 2013. “State-of-the-art cryogenic machining and processing”, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, v. 7, p. 616-648.

Umbrello, D., Rizzuti, S., Outeiro, J.C., Shivpuri, R., M’Saoubi, R., 2008. “Hardness-based flow stress for numerical simulation of hard machining AISI H13 tool steel”, journal of materials processing technology, v. 199, p. 64-73.

Wang, J. J., Zheng, M. Y., 2003. “On the machining characteristics of H13 tool steel in different hardness states in ball end milling”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 22, p. 855-86.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE PEÇAS FABRICADAS VIA IMPRESSÃO 3D NO ENSINO DE CONSTRUÇÃO NAVAL

Data de aceite: 01/09/2023

Gisele Duarte Caboclo Antolin
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Brasil

Mauricio Quelhas Antolin
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Brasil

Paula de Castro Brasil
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Brasil

Maria Iaponeide Fernandes Macedo
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Brasil

Bruno Sousa da Cunha
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Brasil

Marcelo Musci Zaib Antonio
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Brasil

RESUMO: A técnica de impressão 3d tem sido cada vez mais utilizada em diversos setores da indústria, devido a sua grande versatilidade e potencialidade. Devido a isto, tem sido empregada em diversos setores da indústria. Contudo, a utilização deste processo de fabricação no setor naval ainda é modesta. Uma das questões a serem discutidas é o preço das peças fabricadas e a variação das propriedades das peças com a variação dos parâmetros de impressão. Desta forma, este artigo abordará como a variação de parâmetros como ângulo de impressão, velocidade de impressão, preenchimento e temperatura das camadas alteram as propriedades de corpos de prova, feitos de ABS, fabricados via impressão 3d utilizando a técnica FDM (Modelagem por deposição fundida). Além disso, com os melhores parâmetros encontrados, foram fabricados 3 protótipos de peças para o setor naval: o protótipo de um mancal, que é utilizado em lemes de embarcações de pequeno porte, um protótipo de uma hélice utilizada em embarcações de médio porte e um protótipo de rolamento. Para determinação das propriedades mecânicas foram realizados testes de tração e de dureza. Com isso, o objetivo central deste artigo é abordar e analisar o uso da tecnologia de impressão 3d no setor naval e a viabilidade deste processo de produção para este setor, bem como o emprego destas peças no ensino.

PALAVRAS-CHAVE: Impressão 3D; Setor Naval; FDM; ABS; ensino.

ABSTRACT: The 3d printing technique has been increasingly used in various sectors of the industry, due to its great versatility and potential. Due to this, it has been used in several sectors of the industry. However, the use of this manufacturing process in the naval sector is still modest. One of the issues to be discussed is the price of the manufactured parts and the variation of the properties of the parts with the variation of the printing parameters. In this way, this article will address how the variation of parameters such as printing angle, printing speed, filling and temperature of the layers change the properties of specimens, made of ABS, manufactured via 3d printing using the FDM technique (Fused Deposition Modeling). In addition, with the best parameters found, 3 prototypes of parts for the naval sector were manufactured: a prototype of a bearing, which is used in rudders of small vessels, a prototype of a propeller used in medium-sized vessels and a bearing prototype. To determine the mechanical properties, tensile and hardness tests were performed. Thus, the main objective of this article is to approach and analyze the use of 3d printing technology in the naval sector and the feasibility of this production process for this sector as well as the use of these pieces in teaching.
KEYWORDS: 3D printing; Naval Sector; FDM; ABS; Teching.

1 | INTRODUÇÃO

A busca pela maior competitividade no mercado, têm levado as empresas a buscarem tecnologias que as auxiliem na melhoraria dos processos de fabricação, na melhoria da qualidade de seus produtos e sobretudo na redução dos custos. Uma das tecnologias que tem despontado no mercado é a impressão 3D, que é uma técnica que consiste em construir sólidos tridimensionais, através da sobreposição de camadas. Também conhecida como produção por manufatura aditiva, essa técnica possui como vantagens a redução de desperdício de matéria prima e redução de custos em relação a outros processos de fabricação usualmente empregados na manufatura (Camargo et al., 2021).

A primeira impressora 3D surgiu na década de 80 e foi criada por Chuck Hull. Essa primeira impressora seguia um método chamado estereolitografia, que consiste na solidificação de resinas através de prototipagem rápida para a obtenção do objeto em 3D. Após quatro anos já em 1988, começaram a ser comercializadas impressoras do tipo FDM (Fused deposition modeling) – Modelagem por Deposição Fundida. Desenvolvidas pela empresa Sott Scrump, essas impressoras entregavam o objeto final através de extrusão de material, que é o método mais utilizado até os dias atuais (Alcade et al., 2018).

Nos últimos anos, com o avanço da tecnologia e a melhoria dos métodos de produção, vários setores industriais já utilizam a prototipagem 3D, como exemplo, os setores automotivo e aeroespacial, e até outros setores profissionais como, medicina, engenharia e arquitetura.

Na área da saúde, por exemplo, destacam-se as próteses feitas sob medida para os pacientes, que podem ser impressas em algumas horas, e na odontologia, espera-se

que o uso de aparelhos ortodônticos feitos de metal desapareça com o tempo, devido ao fato de já existirem várias empresas trabalhando com modelos fabricados com poliuretano, que também são feitos sob medida para os pacientes, e já foram comprovados serem mais eficientes do que os modelos metálicos (Rodrigues et al., 2018).

Em relação a indústria automobilística, as aplicações da impressão 3d são diversas e vão desde a fabricação de painéis frontais e arcos de roda, a pequenas peças para o interior dos veículos (Gomes et al., 2020). Nas áreas de engenharia e arquitetura ganham destaque as soluções personalizadas para a decoração de ambientes, e até mesmo a construção de casas e edifícios na área da construção civil (Sacramento, 2021).

Na educação básica, a utilização da impressão 3d tem ganhado destaque com a elaboração de projetos voltados para a cultura maker. No ensino superior encontram-se aplicações de seu emprego em cursos de medicina, arquitetura e engenharia.

Contudo, a despeito dos setores citados acima já utilizarem extensivamente a tecnologia de impressão 3d, verifica-se que a utilização desta tecnologia ainda é tímida no setor naval. Conforme apontado por Trisciuzzi (2018), é de vital importância que a manufatura aditiva seja efetivamente implementada na indústria naval, conduzindo a um barateamento dos produtos e serviços, e fomentando o desenvolvimento de pesquisas neste setor. Isto faz-se necessário sobretudo devido à mudança no crescimento do setor naval brasileiro. Enquanto no início dos anos 2000 ocorreu uma importante elevação do número de embarcações brasileiras, a partir de 2014 o setor vem enfrentando um período de estagnação. Devido a isto, o setor naval brasileiro possui um grande gap tecnológico, tanto no que diz respeito à construção de novas embarcações quanto às tecnologias e logística para o reparo das mesmas (Sinaval, 2018).

Dentre as aplicações para o setor naval, podemos citar a construção de cascos de uma embarcação de pequeno porte (Trisciuzzi, 2018), que foi possível dividindo-se o desenho do casco em blocos que foram impressos em grupos, a fabricação de um propulsor em tamanho real com propósito de verificar o potencial da impressão 3d nestes equipamentos, a fabricação de protótipos para competições estudantis e a fabricação de peças de reposição para embarcações.

Em relação a esta última aplicação, existe uma grande diferença no período de tempo usado para se fabricar uma embarcação e o período de tempo disponível para o reparo e manutenção da mesma. O primeiro pode levar um longo período de tempo, que depende do tipo da embarcação a ser construída, o que pode durar de meses a anos. Por outro lado, os serviços de reparo e manutenção são realizados em poucas semanas e, portanto, faz-se necessário que o serviço de reparo ocorra próximo à rota da embarcação. Outra diferença é o fato de que os estaleiros de reparo devem dispor de maior variedade de ferramentas do que as exigidas pelos construtores, já que cada embarcação que necessita de reparo tem suas particularidades.

No Brasil, a indústria de peças de reposição é ainda uma das fragilidades deste setor, em virtude das durações de reparos periódicos e reparos de operação, que ainda são superiores à de outros países, tais como a China e alguns outros países da Ásia. Conforme apontado por Pinhão et al. (2019) o prazo de entrega e substituição de peças é o fator mais importante para as companhias de navegação, o que faz com que o país ainda careça de desenvolvimento neste aspecto.

Além disso, após o grande aumento experimentado pelo setor naval no Brasil entre os anos de 2003 e 2014, o pa**ís** atravessou uma grave crise, que ocorreu principalmente em virtude da grave crise da economia brasileira e da Petrobras. Neste período, em virtude do retrocesso deste setor, houve uma redução da demanda de peças de reposição e manutenção, fazendo com que esta necessidade fosse absorvida por empresas estrangeiras.

Ainda no ano de 2014, uma pesquisa feita pela Clarksons Shipping Intelligence divulgou o ranking da construção naval mundial, analisando o número de embarcações construídas em cada país naquele ano. Nesta avaliação, o Brasil ocupava a quarta posição, logo acima dos EUA. De acordo com o Sindicato da Indústria Naval, há pelo menos sete anos não ocorrem negociações consistentes no setor de petróleo e gás no país, além disso, o número de empregos no setor teve uma queda de mais de 60% em relação a 2014, o pico da atividade neste setor (Sinaval, 2014).

Cabe destacar, que de acordo com Pinhão (2019), no ano de 2018, o valor do mercado global de serviços de reparo e manutenção naval foi da ordem de US$ 20 bilhões, e estima-se que será de algo em torno de US$ 40 bilhões em 2028, de acordo com um estudo realizado pela Future Market Insights (FMI).

Para o ano de 2022, a grande questão a ser enfrentada diz respeito aos efeitos causados na economia devido à pandemia de covid 19. Somente no ano de 2020, observou-se uma queda significativa no comércio marítimo, somente comparada à crise financeira internacional do ano de 2009, indicando uma queda de mercado de 4,4%. Espera-se que nos próximos anos este mercado volte a se expandir, o que será obtido sobretudo a partir do desenvolvimento tecnológico e da solução de problemas, já aqui anteriormente apontados, enfrentados pelo setor (Gavalas et al., 2022).

Uma das tecnologias que tem sido amplamente discutidas para resolver a questão da duração dos reparos das embarcações é a impressão 3D. Uma das aplicações desta tecnologia no setor naval foi apontada pela empresa ShipParts. A ideia consiste em uma mudança na estratégia de aquisição de peças para o reparo de embarcações. Ao invés de adquirir uma peça e enviá-la ao cliente, a empresa almeja fornecer arquivos digitais a um especialista em impressão 3D que esteja localizado próximo ao cliente, reduzindo a logística e desta forma minimizando os custos de produção, além de ser possível uma redução em 80% o tempo de processamento de pedidos de peças de reposição (Portos e Navios, 2020).

Porém, o estado atual da tecnologia de impressão 3d, o preço da peça fabricada através da impressão possui um valor mais elevado que a peça fabricada de forma tradicional, porém, estima-se que isso mude no futuro, já que as peças possuem qualidade equivalente e podem ser fabricadas em uma ampla gama de materiais (Portos e Navios, 2020).

Nesse contexto, a proposta deste trabalho foi avaliar a utilização da impressão 3D por método FDM na indústria naval, com a produção de protótipos de peças utilizadas em embarcações, avaliando suas resistências mecânicas em diferentes parâmetros de impressão como velocidade de impressão, temperatura de extrusão, ângulo de impressão e preenchimento. A fabricação de protótipos possui grande aplicabilidade no setor de ensino, pois permite aos alunos o contato material com peças que poderiam ser vistas apenas no papel, sendo desta forma, uma importante ferramenta para o ensino.

Para este trabalho foram fabricadas peças que conseguissem atender as demandas de resistência necessárias para ser utilizada como protótipo, já que estas serão desenvolvidas em polímero ABS. Uma das propostas para a fabricação destes protótipos é a sua aplicação na indústria e em competições universitárias, tais como o Desafio Universitário de Nautidesign (DUNA). Desta forma, realizamos um estudo voltado para a avaliação de como a variação de parâmetros tais como velocidade e ângulo de impressão e temperatura de extrusão afetam as propriedades mecânicas das peças. Após a realização deste estudo os parâmetros que conduziram as melhores propriedades foram utilizados para a fabricação de 3 tipos de protótipos (1 mancal, 1 hélice de embarcação e 1 rolamento) com vistas a utilização de embarcações em competições estudantis.

2 I MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Escolha das peças e processo de fabricação

Os corpos de prova utilizados neste estudo foram projetados no software Autocad (figura 1). Foram feitos dois corpos de prova de tamanhos diferentes, um maior e um menor, as medidas de ambos podem ser vistas na figura 1. Cabe destacar que os corpos de prova da figura 1-b foram fabricados de acordo com a norma ASTM 638.

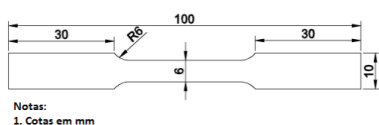
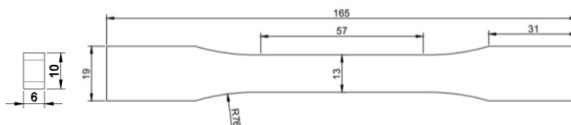



Figura 1-a Cotas do corpo de prova menor. Figura 1-b Cotas do corpo de prova maior.

Após isto, os corpos foram fabricados via impressão 3d em diferentes parâmetros que são sumarizados na tabela 1 (variação da velocidade de impressão), na tabela 2 (variação do preenchimento), na tabela 3 (variação da temperatura das camadas) e na tabela 4 (variação do ângulo de impressão). Os corpos de prova foram impressos em ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) utilizando a técnica FDM em uma impressora GTmax 3D modelo H5 (figura 2), aliado ao fatiador simplify 3D. Em resumo, esse modo de impressão 3D derrete um filamento do material escolhido, que no caso desse projeto foi o ABS, e o coloca sobre uma mesa aquecida no formato do arquivo de CAD que foi enviado a impressora. Esse filamento derretido vai sendo colocado camada por camada, até que se chegue ao objeto final. A figura 3 mostra a impressão de alguns corpos de provas obtidos para este trabalho.

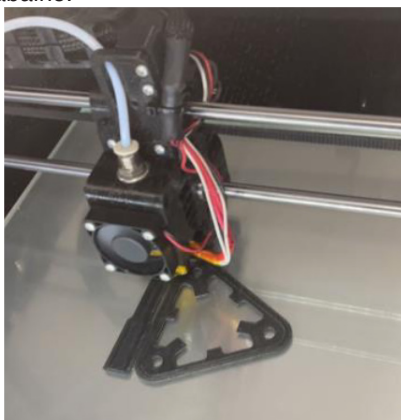



Figura 2 - Processo de fabricação da peça em FDM. Figura 3 - Corpos de prova.

2.1.1 Variação da velocidade de impressão e do preenchimento

Para esta primeira parte do trabalho foram variados a velocidade de impressão e o preenchimento da peça, os demais parâmetros que foram mantidos fixos durante a fabricação da peça foram a temperatura da mesa que foi igual a 110oC, a temperatura de extrusão da primeira camada foi 250oC e a temperatura de extrusão da segunda camada foi 235oC. A tabela 1 mostra os parâmetros variados:

Velocidade (mm/s)	**7100**	**7150**	**7200**	**7250**	**7300**	**7200**	**7200**	**7200**
Preenchimento	**20%**	**20%**	**20%**	**20%**	**20%**	**15%**	**25%**	**30%**

Tabela 1 - Variação de parâmetros por peça.

Fonte: O Autor.

Dos resultados encontrados, os parâmetros que conduziram as melhores propriedades foram escolhidos para serem utilizados na fabricação de um Mancal da

marca SKF, do tipo FNL 508 B + 22208 K + H 308 (SKF, 2022), que pode ser observada nas figuras 4. Este tipo de mancal é utilizado em navios em lugares que precisam deixar um eixo giratório firme, sem instabilidades, por exemplo, as hélices. Para a fabricação do protótipo seu tamanho foi reduzido em 50%, e desta forma o mesmo foi fabricado com diâmetro externo de 52,5 mm, diâmetro interno 17,5 mm, largura igual a 33 mm e 80 mm de comprimento. Na figura 5 temos uma imagem de um corpo de prova e de um mancal construídos para este trabalho.

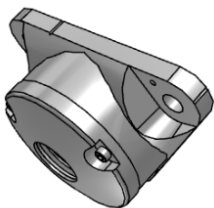



Figura 4-a Perspectiva.

Fonte: O Autor.

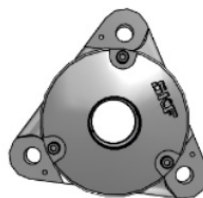



Figura 4-b Vista superior.

Fonte: Skf (2022)

Figura 5 - Mancal e um corpo de prova.

Fonte: O Autor.

2.1.2 Variação da temperatura de extrusão

Para a segunda parte do trabalho, entre os parâmetros de impressão, apenas as temperaturas de extrusão foram alteradas, a temperatura da mesa foi mantida em 110oC, todas as impressões foram feitas com a velocidade de impressão em 7200 mm/s e com 20% de preenchimento.

Conforme mostrado na tabela 2, para as temperaturas de extrusão, na primeira bateria de impressões foram utilizados os valores de 240°C a 260°C para a primeira camada, enquanto as demais camadas foram mantidas em 225°C. Na segunda bateria de impressões, a primeira camada foi mantida em 250°C, e as demais foram alteradas entre os valores de 215°C a 235°C.

Variação da primeira camada					
Temperatura (°C)	**240**	**245**	**250**	**255**	**260**
Variação da segunda camada					
Temperatura (°C)	**215**	**220**	**225**	**230**	**235**

Tabela 2 – Variação da temperatura das camadas.

Fonte: O Autor.

Dos resultados encontrados, os parâmetros que conduziram as melhores propriedades foram escolhidos para serem utilizados na fabricação de um protótipo de uma hélice para embarcação. O protótipo da hélice foi desenhado em autocad e depois fabricado via impressão 3d, com as dimensões 10 cm X 1 cm X 0,5 cm (Figura 6).

Figura 6 – Protótipo de hélice.

Fonte: O Autor.

2.1.3 Variação da orientação de fabricação

Para esta parte do trabalho os corpos de prova foram fabricados via impressão 3d na direção longitudinal e transversal. A temperatura da mesa foi mantida em 110oC, todas as impressões foram feitas com a velocidade de impressão em 7200 mm/s e com 20% de preenchimento. Os ângulos utilizados na impressão são mostrados na tabela 3. É importante destacar, que aqui, o ângulo de impressão foi definido como sendo o ângulo formado entre a peça e o eixo x. conforme mostrado na figura 7.

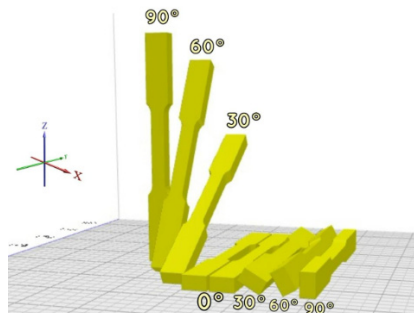



Figura 7: Peças impressas com diferentes ângulos de impressão.

Fonte: O Autor.

Direção	Ângulos (°)			
Horizontal	0	30	60	90
Vertical	0	30	60	90

Tabela 3: Ângulos utilizados para a fabricação das amostras.

Fonte: O Autor.

Os melhores resultados obtidos para as propriedades mecânicas foram utilizados para a fabricação de um rolamento tal como o mostrado na figura 8, com dimensões 3,9 cm de diâmetro externo, 1,1 cm de diâmetro interno, 1,1, cm de altura, com rolamentos internos de 0,9cm de diâmetro. Este tipo de rolamento pode ser empregado em inúmeras aplicações do setor naval, dentre as quais podemos citar os sistemas de rolamentos de propulsão e demais sistemas de eixos giratórios.

Figura 8: Protótipo de rolamento para o setor naval. Fonte: O Autor

2.2 Ensaios Mecânicos

Foram realizados dois tipos de ensaios de mecânicos nos corpos de prova: o ensaio de dureza e o ensaio de tração.

O ensaio de dureza shore D foi feito para analisar a dureza em cada um dos corpos de prova de cada variação de parâmetro. Seguindo a norma utilizada para medidas de dureza (Norma ASTM 2240), este valor foi medido em 5 pontos diferentes da peça. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Polímeros da UEZO (UERJ-ZO).

O segundo teste que os corpos de prova foram submetidos foi o ensaio de tração. Esse teste foi realizado pela TECPOL do IPRJ seguindo a norma ASTM D638 (tipo I) com velocidade de teste de 5mm/min.

3 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos resultados que se seguem, utilizaremos a seguinte designação: sr é a tensão de ruptura, sm é a tensão máxima, se é a tensão de escoamento e E é o módulo de elasticidade.

A tabela 4 mostra um resumo para os resultados encontrados para as peças fabricadas em que se variou a velocidade de impressão e o preenchimento. Em relação ao ensaio de dureza, verificou-a variação de preenchimento e de velocidade de impressão não conduziram a alterações da dureza das peças. Isto pode ser justificado pelo fato de a medida de dureza ser uma medida superficial, atingindo poucos milímetros abaixo da superfície da amostra.

Observando a tabela 4 é possível identificar a dispersão dos valores nos resultados dos ensaios de tração, porém, podemos observar que a amostra que apresentou melhor resistência mecânica foi a amostra fabricada com velocidade de 7200mm/s. Em relação ao módulo de elasticidade, tensão de ruptura e limite de resistência, também não foi verificada uma tendência de aumento ou redução em função do aumento da velocidade. Isto indica a existência de um valor ótimo para a velocidade de impressão em relação aos outros parâmetros utilizados.

Isto pode estar relacionado ao fato de que a velocidade de impressão afeta a temperatura de extrusão, pois quanto maior a velocidade de impressão, maior necessidade de temperatura de extrusão. Isto justificaria a queda da resistência mecânica para maiores valores de velocidade de impressão. Além disso, é importante destacar que quanto mais rápida for a impressão, menos precisa será a impressão. Porém, não podemos reduzir muito a velocidade de impressão pois isso aumenta o tempo de impressão das peças.

Analisando os resultados obtidos para o parâmetro de preenchimento da peça, conseguimos notar que os valores de tensão de escoamento, tensão de ruptura e limite de resistência à tração crescem com o aumento do preenchimento da peça. Desta forma, avaliando-se a questão de resistência podemos concluir que em relação às amostras em que foi variado o preenchimento, a que resultou nas melhores propriedades mecânicas foram as amostras com 25% de preenchimento.

Comparando estes valores com os valores obtidos por Silva (2019), verificamos que a peça deste estudo obteve resultados ótimos com 25% de preenchimento, obtendo tensão de escoamento igual a 11,1 MPa, enquanto na literatura alcançaram 6,22 MPa para 100% de preenchimento, o que mostra que as nossas peças foram mais resistentes. O mesmo foi verificado para o módulo de elasticidade onde Silva (2019) encontrou o valor de 0,34 GPa e neste estudo o valor encontrado foi de 0,57 GPa para amostras com 25% de preenchimento.

Desta forma, podemos confirmar que quanto maior o preenchimento da peça mais resistente às tensões aplicadas a peça será. Isto está em concordância com a literatura e com o fato de que quanto maior for a quantidade de preenchimento mais material a peça terá para resistir aos esforços a ela impostos.

Contudo, cabe destacar que conforme citado por Oliveira (2017), aumentar a porcentagem de preenchimento de um corpo feito por impressão 3D corresponde ao aumento do número de linhas de material plástico em seu interior, o que reflete diretamente em um aumento do tempo de impressão.

Como o processo de fabricação por FDM é feito através da fusão e deposição de filamento, a viscosidade do termoplástico impossibilita o preenchimento completo da amostra. Uma forma de minimizar este efeito é aumentando a temperatura do bico, o que reduz a viscosidade do filamento, possibilitando um melhor preenchimento desses espaços vazios, em detrimento da qualidade dimensional da peça finalizada (Carneiro et al., 2019).

Em relação as peças em que foi variada a temperatura de extrusão da primeira e da segunda camada, os resultados são sumarizados na tabela 5 e na tabela 6. Um fato importante, que tem sido citado em outros trabalhos, é o empenamento sofrido pelas peças fabricadas em ABS. Conforme o apontado por Oliveira (2017), quando o ABS das camadas superiores encontra-se mais aquecido do que o material das camadas inferiores, a peça sofre empenamento em virtude dos diferentes coeficientes de dilatação das camadas. Para evitar este fenômeno, a camada inferior deve manter-se aquecida, além de se aplicar algum produto para melhorar a aderência entre primeira camada e mesa, ou ainda, pode-se adotar a estratégia seguida neste trabalho em que as temperaturas praticadas na extrusão da primeira camada eram superiores as demais camadas, o que evita que o material descole da mesa.

		Valores médios				
	Velocidade (mm/s)	**7100**	**7150**	**7200**	**7250**	**7300**
Velocidade	**σ_m (MPa)**	**16,02**	**15,50**	**15,75**	**15,94**	**16,09**
	σ_r (MPa)	**14,78**	**13,98**	**14,42**	**14,24**	**14,57**
	E (GPa)	**0,61**	**0,50**	**0,47**	**0,53**	**0,58**
	σ_e (MPa)	**11,4**	**9,7**	**11,8**	**11,3**	**8,4**
	Dureza (Shore D)	**22**	**22**	**22**	**22**	**22**
		Valores médios				
		15%	**20%**	**25%**		
Preenchimento	**σ_m (MPa)**	**15,62**	**15,75**	**15,98**		
	σ_r (MPa)	**14,14**	**14,42**	**14,95**		
	E (GPa)	**0,50**	**0,47**	**0,57**		
	σ_e (MPa)	**10,4**	**10,9**	**11,1**		
	Dureza (Shore D)	**22**	**22**	**22**		

Tabela 4 - Análise das médias dos valores de ensaio para cada parâmetro.

Fonte: O Autor.

	Valores médios					
Temperatura da primeira camada	T (°C)	240	245	250	255	260
	σ_m (MPa)	15,90	15,97	15,72	15,96	15,77
	σ_r (MPa)	14,79	14,62	14,87	14,75	14,54
	E (GPa)	0,56	0,67	0,67	0,62	0,57
	σ_e (MPa)	15,86	15,69	15,58	15,67	15,50
	Dureza (Shore D)	67,8	67	65	64	66,4
	Valores médios					
Temperatura da segunda camada	T (°C)	215	220	230	235	
	σ_m (MPa)	16,3	16,05	14,59	14,81	
	σ_r (MPa)	15,37	14.55	14,74	13,54	
	E (GPa)	0,51	0,53	0,91	0,57	
	σ_e (MPa)	15,87	15,38	14,98	13,98	
	Dureza (Shore D)	65,2	64,6	68,4	70	

Tabela 5: Resultados encontrados para a variação da temperatura de extrusão.

Fonte: O Autor.

Pode-se observar que a redução da temperatura da primeira camada favorece o aumento de resistência da peça, conforme pode ser observado nos valores de tensão de escoamento do material. O mesmo pode ser observado em relação ao aumento da temperatura da segunda camada.

Contudo, verificou-se que o aumento da temperatura favoreceu o aumento do módulo de elasticidade e da tensão de ruptura para a segunda camada, bem como o aumento no valor da dureza das peças.

Estes resultados concordam com o trabalho de Oliveira (2017) que mostrou que o grau de cristalinidade de um polímero, pode ser entendido como uma espécie de empacotamento das moléculas de um material. Devido a isto, quanto maior a temperatura utilizada na fabricação, menos próximas e concentradas se encontram as moléculas. Assim sendo, ao se aplicar uma temperatura maior para a impressão, os polímeros acabam atingindo um grau menor de cristalinidade.

Comparando estes resultados com os encontrados por Zekavat et al. (2018), que estudou o efeito da temperatura de impressão em peças fabricadas via FDM através de tomografia computadorizada, verifica-se que neste trabalho, as peças impressas em temperaturas mais baixas tinham maiores lacunas de ar, o que provocou uma diminuição de sua resistência. Isso significa que, para peças mais resistentes, as temperaturas de impressão mais altas são ideais.

Em relação as peças em que se variou a direção e o sentido de impressão, temos os resultados sumarizados na tabela 6.

		Valores médios			
		0º	30º	60º	90º
Orientação de impressão (Horizontal)	σ_m (MPa)	15,18	19,19	10,97	17,08
	σ_r (MPa)	14,21	18,43	10,97	16,21
	E (GPa)	0,34	0,23	0,22	0,37
	σ_e (MPa)	14,23	13,23	11,23	17,95
	Dureza (Shore D)	22	22	21,8	21,9
		Valores médios			
		0º	30º	60º	90º
Orientação de impressão (Transversal)	σ_m (MPa)	15,27	13,06	11,74	18,05
	σ_r (MPa)	13,96	12,05	11,74	16,75
	E (GPa)	0,33	0,17	0,31	0,36
	σ_e (MPa)	14,33	13,46	10,14	17,92
	Dureza (Shore D)	22	22	22	22

Tabela 6 – Parâmetros utilizados para a impressão de peças com diferentes orientações.

Fonte: O Autor.

A primeira observação a ser feita é que o tempo de impressão é influenciado pela variação de direções e sentidos de impressão. Esta diferença de tempo é explicada pela velocidade de movimentação no eixo Z ser inferior aos valores encontrados nos eixos X e Y, além de variar a quantidade de material consumido na fabricação das peças, uma vez que em algumas direções é necessário o uso de suportes.

Os resultados das tabelas 6 mostram que os valores de dureza se mantiveram constantes, o que mostra que esta propriedade não é sensível a variação da direção e do sentido de impressão. Em relação a resistência mecânica, observa-se que as amostras impressas a 90º Horizontal, seguidas das amostras impressas a 90º Vertical, foram aquelas que apresentaram maiores valores de tensão de escoamento e módulo de elasticidade. Estes resultados concordam com o verificado por (Oliveira, 2019). A variação da resistência mecânica em função da direção e sentido da impressão podem ser explicados pelo modo como as moléculas poliméricas são formadas após o polímero ser derretido no bico da impressora. Quanto mais ramificações e mais fases o polímero possuir, maiores serão as variações de suas propriedades. É importante salientar que, conforme destacado por Galeja et al. (2020), peças fabricadas por impressão 3d possuem valores de resistência

mecânica inferiores àqueles previstos pela teoria em virtude da porosidade encontrada nas mesmas.

Apesar de neste trabalho não investigarmos a fratura dos materiais, foi encontrado na literatura o trabalho de Yao et al. (2020), que propõem um modelo no qual verificam que corpos de prova impressos com ângulo entre 45 a 90º, a fratura ocorre com o rompimento das cadeias poliméricas, de forma a atravessar as camadas poliméricas "in layer".

4 I CONCLUSÃO

Através deste trabalho podemos verificar como os parâmetros de impressão e a trajetória de extrusão afetam as propriedades mecânicas do ABS fabricado via impressão 3d. Foram fabricados uma série de corpos de prova, onde pode-se observar que o aumento do preenchimento das peças aumenta a resistência das mesmas, a velocidade de impressão possui um valor ótimo que depende dos demais parâmetros empregados no processo, a redução da temperatura da primeira camada favorece o aumento de resistência da peça, assim como o aumento da temperatura da segunda camada. Em relação a orientação da impressão, podemos verificar que as peças impressas a 90º (na horizontal ou na vertical), foram aquelas que exibiram maior resistência mecânica.

A adoção destes parâmetros permitiu a fabricação de protótipos de peças para o setor naval, o que demonstra a viabilidade do uso desta técnica para este setor, e define os melhores parâmetros a serem utilizados.

As peças fabricadas possuem grande potencial para serem utilizadas no ensino, de forma a facilitar a visualização e interpretação das mesmas. Além disso, podem ser utilizadas em projetos multidisciplinares que envolvam desde a disciplina de desenho técnico até a disciplina de projetos de embarcações, o que demonstra o grande potencial da mesma na área de ensino.

AGRADECIMENTOS

À FAPERJ pelo suporte financeiro e a TECPOL pela realização dos ensaios de tração.

REFERÊNCIAS

Alcade, E., Wiltgen, F. Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro, Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté, Taubaté, v. 24, n. 2, p. 12-20, 2018.

Camargo, G. R. R., Barbosa, P. A. G. Santos, F. A. Impressão 3D na Manutenção Industrial e a Redução de Custos. ABCustos, São Leopoldo: Associação Brasileira de Custos, v. 16, n. 1, p. 118-143, jan.-abr. 2021

Carneiro, L. R. R., Barbar, G. D., Santos, L. C. P., Guarato, A. Z. Influência da Temperatura da Mesa de Impressão 3D na Dureza e Dimenções Geométricas da Amostras em ABS. Em: XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2019. 19 a 23 de agosto de 2019, Ilhéus, BA, Brasil,

Galvalas, D., Syriopoulos, T., Tsatsaronis, M. COVID–19 impact on the shipping industry: An event study approach. Transport Policy, 116, 157-164, 2002

Gomes, J. F. B., Wiltgen,. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 1-16, jun. 2020.

Oliveira, D. S. C. Efeito do ângulo de Impressão Nas Propriedades de Peças Poliméricas Impressas em 3D. Trabalho de Conclusão de Curso, Licenciatura em física, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba. 2019.

Oliveira, G. A. Influência das Propriedades Dos Polímeros Nas Características Finais Das Peças Obtidas Por Impressão 3D. Departamento de Engenharia Mecânica Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2017.

Pinhão, C. M. A. M., Rocio, M. A. R., Mendes, A. P. A., Teixenta, C. A. N., Prates, H. F. Estaleiro de Reparo e Manutenção Naval. BNDES Set., Rio de Janeiro, v. 25, n. 50, p. 67-107, set. 2019.

PORTOS E NAVIOS. Disponível em: Disponível em: https://www.portosenavios.com.br/noticias/ind-naval-e-offshore/a-impressao-3d-pode-revolucionar-a-aquisicao-de-pecas-de-reposicao. Data de acesso: 05/07/2022.

PORTOS E NAVIOS. Disponível em: https://www.portosenavios.com.br/noticias/ind-naval-e-offshore/a-impressao-3d-pode-revolucionar-a-aquisicao-de-pecas-de-reposicao. Data de acesso: 03/07/2022.

Rodrigues Jr, J. L., Cruz, L. M. S., Sarmanho A. P. S. Impressora 3D no desenvolvimento de pesquisas com próteses. Rev. Interinst. Bras. Ter. Ocup. Rio de Janeiro. 2018. v.2(2): 398- 413.

Sacramento, L., P., B. Desenvolvimento de Protótipos Estruturais Com Uso da Impressora 3D Para o Ensino da Arquitetura. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal do Espírito Santo. Curso de Arquitetura e Urbanismo. 2021.

SINAVAL. Disponível em: http://sinaval.org.br/2017/04/brasil-e-o-quarto-maior-construtor-naval-do-mundo/. Data de acesso: 06/07/2022/.

SINAVAL. Disponível em: http://sinaval.org.br/2018/07/industria-naval-brasileira-vive-grave-crise-a-espera-de-encomendas-com-queda-de-64-nos-empregos-desde-2014/. Data de acesso: 05/07/2022

SINAVAL. Disponível em: http://sinaval.org.br/2020/07/impressao-3d-no-setor-naval/. Data de acesso: 04/07/2022.

SKF. Disponível em: https://www.skf.com/br/products/mounted-bearings/bearing-housings/flanged-housings-fnl-series/productid-FNL%20508%20B%20%2B%2022208%20K%20%2B%20H%20308. Acesso em: 19 jan. 2022.

Yao, T., Ye, J, Deng, Z., Zhang, K., Ma, Y., Ouyang, H. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. Composites Part B: Engineering. Volume 188, 1 May 2020.

Zekavat, A. R., Jansson A., Larsson, J., Pejryd, L. Investigating the effect of fabrication temperature on mechanical properties of fused deposition modeling parts using X-ray computed tomography. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 100, pages287–296 (2019).

SOBRE OS ORGANIZADORES

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutor em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

GÉSSICA KATALYNE BILCATI - Professora do Curso de Engenharia Civil na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Guarapuava. Possui Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Materiais e Componentes de Construção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Curitiba. Desenvolveu pesquisas relacionadas à painéis cimento-madeira. Atualmente é doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), na área de compósitos cimentícios com adição de materiais celulósicos.

ÍNDICE REMISSIVO

INNOVATE:

ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALÚRGICA

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Ano 2023

INNOVATE:

ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALÚRGICA

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Ano 2023